

Tech.

118. oe

Transformatoren

für

Wechselstrom und Drehstrom

von

Gisbert Kapp

Teck. 118 oe

Kapp

Transformatoren

für

Wechselstrom und Drehstrom.

Eine Darstellung
ihrer
Theorie, Konstruktion und Anwendung.

Von
Gisbert Kapp.

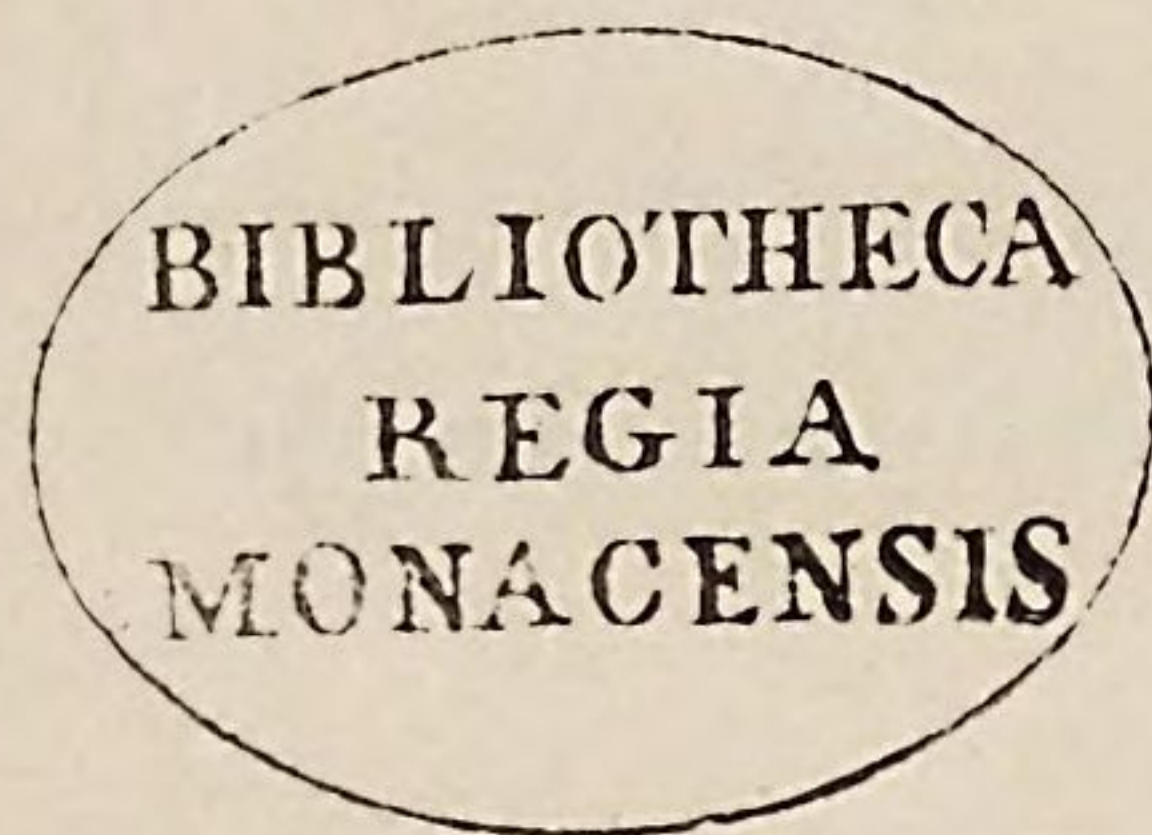
Mit 133 in den Text gedruckten Abbildungen.

Berlin.
Julius Springer.

1895.

München.
R. Oldenbourg.

Alle Rechte vorbehalten.



Vorwort.

Werke, welche die Konstruktion von Dynamomaschinen behandeln, sind in großer Zahl vorhanden; dagegen ist die Literatur in Bezug auf Transformatoren noch sehr spärlich. Man findet allerdings in Büchern elektrotechnischen Inhaltes diesen Gegenstand ab und zu erwähnt, aber selten eingehend behandelt. Der Grund, warum der Transformator in der Literatur bisher vernachlässigt worden ist, liegt wohl zum Teil in dem Umstande, daß seine überaus einfache Konstruktion den Theoretikern nicht genug des Interessanten zu bieten verspricht, als daß sie es der Mühe wert fänden, sich eingehend damit zu beschäftigen, während die Praktiker, welche den Gegenstand allerdings zu würdigen wissen, doch nur selten ein Interesse daran haben, ihre mit vieler Arbeit erkauften Erfahrungen zu veröffentlichen. Auf den ersten Blick erscheint ein Transformator jedenfalls als ein viel weniger interessanter Apparat als beispielsweise eine Dynamomaschine; aber diejenigen, die sich praktisch mit Transformatoren befaßt haben, wissen recht gut, daß selbst dieser scheinbar einfache Apparat zu einer Fülle von interessanten wissenschaftlichen Untersuchungen Veranlassung gibt und daß, was übrigens noch viel wichtiger ist, diese Untersuchungen in vielen Fällen zu wertvollen praktischen Ergebnissen führen. Wenn man bedenkt, daß viele Transformatoren das ganze Jahr hindurch Tag und Nacht im Betrieb sind, so erkennt man sofort, von welcher Bedeutung

selbst eine kleine Verbesserung ist; aber solche Verbesserungen kann man nur auf Grund praktischer Erfahrung und eingehenden Studiums machen.

Der Zweck des vorliegenden Werkchens ist, dem Leser als eine Anleitung zu dienen, welche ihn in den Stand setzt, sowohl fertige Konstruktionen von Transformatoren zu beurteilen und zu prüfen, als auch neue zu entwerfen. Ich habe mich dabei bemüht, die theoretische Behandlung so einfach und kurz als möglich zu gestalten. Allerdings leidet dabei das Buch unter dem Umstand, daß die Theorie des Gegenstandes noch manche Lücke enthält; so ist zum Beispiel der Einfluß von Hysteresis auf die Form der Stromkurve und die analytische Darstellung komplizierter Strom- und Spannungskurven durch Fouriersche Reihen, sowie überhaupt die analytische Behandlung von Wechselstromproblemen fortgelassen worden. Andererseits hoffe ich, daß mir der Leser diese Unterlassungssünden verzeihen wird, wenn er bedenkt, daß dieses Buch nicht für Mathematiker und hochwissenschaftliche Elektriker geschrieben ist, sondern für Studierende und praktische Ingenieure, deren Bestreben doch im allgemeinen dahin geht, auf die einfachst mögliche Weise praktisch nützliche Ergebnisse zu erreichen.

Berlin, im Mai 1895.

Gisbert Kapp.

Inhalts-Verzeichnis.

Erstes Kapitel.	Seite
Wesen des Transformators	1
Magnetische Streuung	3
Anordnung der Spulen	7
Ableitung der Grundgleichung	8
Zweites Kapitel.	
Verluste in Transformatoren	15
Einfluß der Spannungskurve auf den Hysteresisverlust	18
Einfluß der Kern- und Spulenform auf die Verluste	23
Kern- und Manteltransformatoren	25
Drittes Kapitel.	
Gebräuchliche Formen	30
Konstruktion des Eisenkörpers	32
Verhältnisse des Eisenkörpers	38
Erwärmung der Transformatoren	40
Versuchsergebnisse	43
Einfluß der linearen Dimensionen	44
Viertes Kapitel.	
Arbeitsleistung eines Wechselstromes	53
Zusammensetzung von Strömen oder Spannungen	60
Bestimmung des Leerlaufstromes	63
Einfluß von Stofsfugen	68
Fünftes Kapitel.	
Konstruktion eines Transformators	70
Günstigste Verteilung des Kupfergewichtes	72
Kosten des aktiven Materiales	77
Günstigste Verteilung der Verluste	77
Wirtschaftlicher Betrieb	80
Konstruktionsdetails	82

Sechstes Kapitel.

Arbeitsdiagramme	87
Leerlauf	87
Belastung	90
Streuung	92
Arbeitsdiagramme für Transformatoren mit Streuung	96
Spannungsabfall	100
Graphische Bestimmung des Spannungsabfalles	102

Siebentes Kapitel.

Das Dynamometer	120
Das Wattmeter	123
Messung von unregelmäßigen Strömen	127
Andere Methoden der Energiemessung	133
Prüfung von Transformatoren	139
Untersuchung von Blechen	142

Achtes Kapitel.

Sicherheitsmafsregeln für Transformatoren	149
Unterstationen und Einzeltransformatoren	153
Spannungserhöher	158
Serienschaltung	161
Drosselspulen	165
Ausgleichsspulen	166
Dreileitersystem	169
Ausgleichstransformator	169
Scott's System der Stromverteilung	170

Neuntes Kapitel.

Beschreibung und Illustration der von einigen Firmen gebauten Transformatoren	172
--	-----

Erstes Kapitel.

Wesen des Transformators. — Magnetische Streuung. — Anordnung der Spulen. — Ableitung der Grundgleichung.

Wesen des Transformators. Wenn die durch eine Drahtspule gehende Kraftlinienzahl N sich ändert, so wird in der Spule eine EMK induziert, welche dem auf die Zeit bezogenen Grad der Änderung $\left(\frac{dN}{dt}\right)$ und der Windungszahl n proportional ist. Wird umgekehrt durch eine Spule ein Strom geschickt, so erzeugt dieser ein durch die Spule gehendes Feld von Kraftlinien, deren Zahl innerhalb gewisser Grenzen dem Produkt von Strom und Windungszahl, also den Ampèrewindungen, proportional ist.

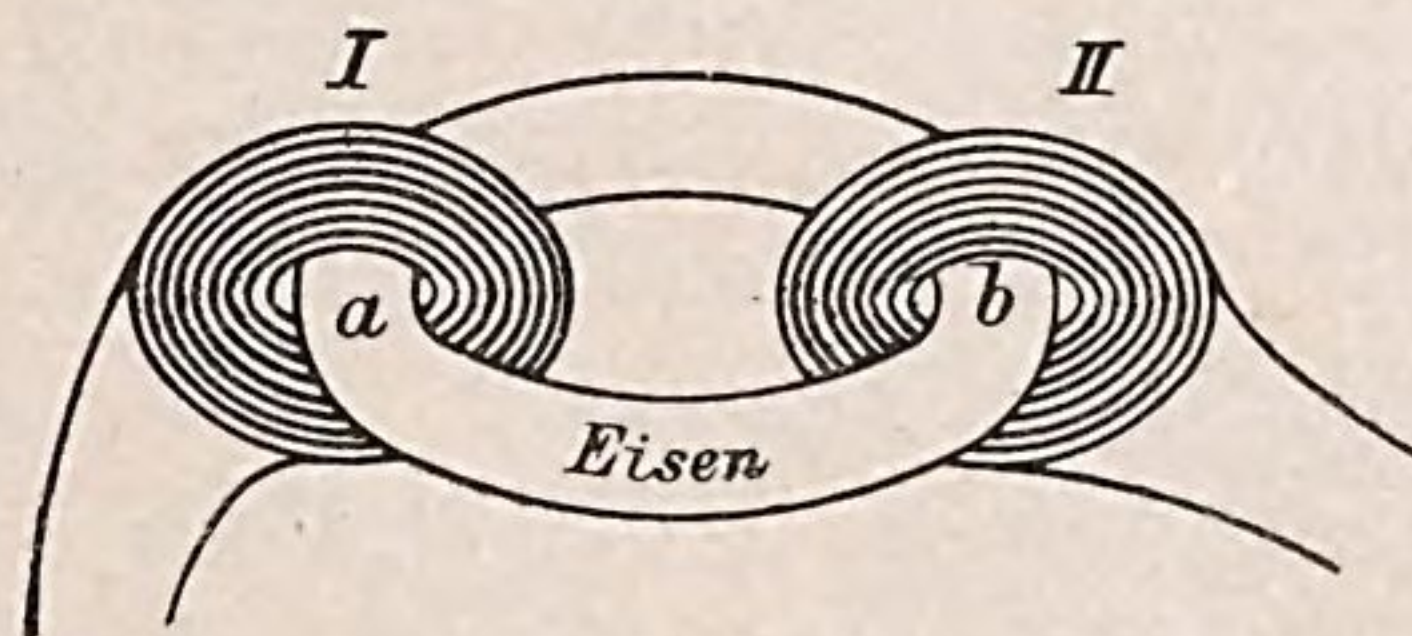


Fig. 1.

Ändert sich der Strom, so ändert sich auch die Anzahl der Kraftlinien. Wenn man also zwei Spulen in solcher Weise anordnet, daß die von der ersten Spule durch einen Strom von wechselnder Stärke erzeugten Kraftlinien ganz oder teilweise durch die zweite Spule gehen, so wird in letzterer eine EMK induziert. Eine solche Anordnung ist in Fig. 1 dargestellt. Um einen Eisenring sind die beiden Spulen I und II gewickelt. Schickt man nun durch I einen Strom, so wird ein Feld von Kraftlinien gebildet, welches teilweise im Eisenringe selbst und teilweise in der die Spule I umgebenden Luft liegt. Es wird somit das Feld im

Innenraum der Spule I bei a die größte Kraftliniendichte haben und im Innenraum der Spule II bei b die kleinste. Der Eisenring wirkt gewissermaßen als ein Träger von Kraftlinien, indem er die Verkettung zwischen den Spulen mit einem beiden gemeinsamen magnetischen Felde bewerkstelligt. Eine solche Verkettung kann auch ohne Vermittelung eines eisernen Zwischengliedes stattfinden, wenn die Spulen im Raume richtig angeordnet sind. So würde bei der gezeichneten Stellung auch ohne Anwendung des Eisenringes das durch den Strom in I erzeugte Feld teilweise durch II gehen, aber seine Stärke daselbst würde sehr gering sein. Auch bei Aufeinanderlegen der beiden Spulen würde das Feld durch II gehen, und die induktive Wirkung würde größer als im vorigen Falle sein, jedoch immer nicht so groß als bei Anwendung eines Eisenringes. Stellt man jedoch, ohne Eisen anzuwenden, die Spulen so auf, daß die Axe von I in die Ebene von II zu liegen kommt oder umgekehrt, so geht keine der Kraftlinien des durch den Strom in I erzeugten Feldes durch die Spule II, und eine Änderung in der Stärke des Feldes erzeugt in II keine EMK. Die Anwendung von Eisen als verkettendes Zwischenglied ist also nicht absolut notwendig, sie hat aber den Vorteil, daß erstens die induktive Wirkung der einen Spule auf die andere sehr bedeutend verstärkt wird, und zweitens diese Wirkung nicht in so hohem Maße von der räumlichen Lage der beiden Spulen gegeneinander beeinflusst wird. Ein solcher Apparat, der aus zwei Spulen mit gemeinsamem Eisenkern besteht, heißt ein Wechselstrom-Transformator.

Wir haben gesehen, daß die in der Spule II oder der sekundären Spule induzierte EMK dem auf die Zeit bezogenen Änderungsgrad der Stromstärke in der Primärspule proportional ist. Da nun die Stromstärke sich nicht immerwährend in einem Sinne ändern kann (denn dann müßte sie ins Unendliche ansteigen), so müssen Perioden von ansteigender und abnehmender Stromstärke miteinander wechseln. Wenn nun bei anwachsendem Strom in der sekundären Spule eine EMK in einer Richtung entsteht, so muß bei abnehmendem Strom die EMK in der entgegengesetzten Richtung auftreten; und wir sehen somit, daß Stromschwankungen in der Primärspule, selbst wenn die Richtung des Stromes nicht geändert wird, eine abwechselnd positive und negative EMK in der Sekundärspule erzeugen. Diese Wechsel-

spannung bringt nun in einem mit den Enden der Spule verbundenen Leiter einen Wechselstrom hervor. Wir können somit einen pulsierenden Gleichstrom in einen Wechselstrom, niemals aber in einen Gleichstrom verwandeln. Statt eines pulsierenden Gleichstromes können wir aber auch einen Wechselstrom durch die primäre Spule schicken und diesen in einen zweiten Wechselstrom verwandeln, dessen Spannung von derjenigen des Primärstromes und dem Verhältnis der Windungszahlen in den beiden Spulen abhängt.

Magnetische Streuung. Bevor wir auf die Berechnung der Spannung eingehen, wollen wir das Verhalten des Feldes in Bezug auf beide Spulen näher untersuchen. Da Kraftlinien nicht nur durch Eisen, sondern auch durch Luft gehen, so werden nicht alle Kraftlinien, welche bei a die Spule I durchsetzen, auch bei b durch die Spule II gehen, und zwar wird der Unterschied um so größer sein, je weiter die beiden Spulen voneinander entfernt liegen, und je größer der Widerstand ist, welchen das Eisen des Ringes dem Verlauf der Kraftlinien (in der Folge magnetischer Fluß genannt) entgegensetzt. Durch diesen Widerstand werden Kraftlinien, welche bei a noch durch das Eisen fließen, zu beiden Seiten dieses Punktes aus der Eisenmasse herausgedrängt und schließen sich in der Luft, d. h. außerhalb der Spule II. Diese Kraftlinien, welche sich in der Luft zerstreuen (daher der Ausdruck magnetische Streuung), tragen nichts zur Erzeugung einer EMK in II bei, wenn durch Stromschwankungen in I oder durch einen Wechselstrom in I der gesamte magnetische Fluß geändert wird. Je mehr magnetische Streuung der Apparat hat, desto kleiner ist die in der Spule II induzierte EMK. Um nun die Verhältnisse beurteilen zu können, welche die Streuung beeinflussen, wollen wir zunächst annehmen, daß in I ein Gleichstrom fließt und in II entweder kein Strom fließt oder auch ein Gleichstrom, der jedoch so gerichtet ist, daß er das durch I erzeugte Feld zu schwächen bestrebt ist. Spule I treibt also einen Fluß magnetischer Kraftlinien in einer bestimmten Richtung durch den Eisenring. Fließt in Spule II kein Strom, so ist dabei bloß der magnetische Widerstand des Eisens zu überwinden, und es werden verhältnismäßig wenig Kraftlinien, die in a durch die Spule gehen, das Eisen verlassen und ihren Weg durch die Luft nehmen. Fließt jedoch in II auch ein Strom, so ist derselbe bestrebt, einen

Kraftlinienfluß in der umgekehrten Richtung zu bilden, der sich mit dem durch I erzeugten Flusse staut und dadurch eine viel stärkere Streuung der Kraftlinien aus dem Eisen heraus und durch den Luftraum hervorbringt.

Dieser Vorgang läßt sich leicht mit Hilfe einer hydraulischen Analogie veranschaulichen. Denken wir uns ein ringförmiges Rohr aus porösem Material (Fig. 2), welches ganz mit Wasser gefüllt ist und unter Wasser liegt. In diesem Rohr soll durch

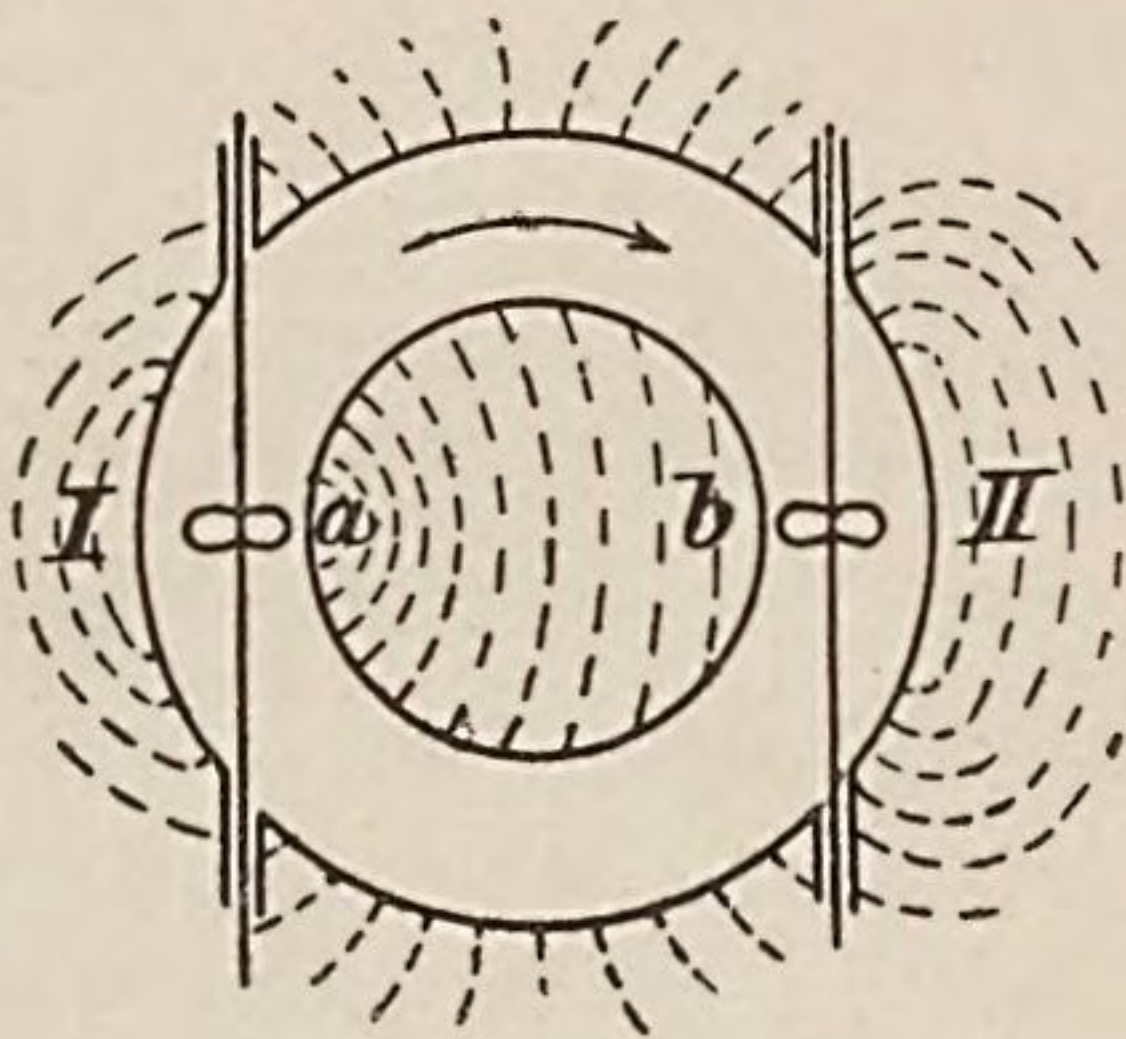


Fig. 2.

Drehung des Flügelrades I eine kontinuierliche Zirkulation von Wasser in der Pfeilrichtung erzeugt werden. Es muß also das Flügelrad eine Druckdifferenz erzeugen, welche zur Überwindung des Reibungswiderstandes dient. Oberhalb I ist ein größerer Druck als unterhalb, und daher wird Wasser aus den Poren der oberen Hälfte des Rohres ausströmen und durch die Poren in der unteren Hälfte wieder in das Rohr einströmen, wie das durch die punktierten Linien angedeutet ist. Es muß also die Geschwindigkeit des Wassers innerhalb des Rohres bei *a* größer sein als bei *b*. Ist das Rohr weit genug, so ist die durch Reibung verlorene Druckhöhe nicht groß, und mithin die Wasserstreuung sowohl als auch der Geschwindigkeitsunterschied zwischen *a* und *b* unbedeutend. Denken wir uns nun in *b* ein zweites Flügelrad II eingesetzt und dasselbe vorläufig vollkommen frei beweglich, so wird es durch das durchfließende Wasser in Drehung versetzt werden, die Streuung aber nicht vermehren. Wenn wir jedoch die freie Beweglichkeit des Flügelrades II dadurch vermindern, daß wir von seiner Welle Energie entnehmen, so wird es sofort dem Flusse des Wassers einen Widerstand entgegensetzen, und es wird oberhalb von *b* ein größerer Druck herrschen als unterhalb. Die

Druckdifferenz bei a wird dadurch auch steigen, und es wird mit hin jetzt bedeutend mehr Wasser durch die Poren der oberen Hälfte des Rohres aus- und durch die der unteren Hälfte desselben einströmen. Die bei a in der Zeiteinheit durchfließende Wassermenge muß also erheblich größer sein als jene bei b , d. h. die Geschwindigkeit des Wassers bei a muß größer sein als bei b , und die Umdrehungsgeschwindigkeit des Flügelrades wird jetzt kleiner als früher. Dieses aus zwei Gründen; erstens weil die Belastung an und für sich auch bei gleichbleibender Wassergeschwindigkeit die Bewegung verlangsamt, und zweitens weil infolge der Streuung auch die Geschwindigkeit des Wassers vermindert worden ist. Wenn es sich nun darum handelt, den auf letzterer Ursache beruhenden Geschwindigkeitsverlust möglichst zu verkleinern, so können wir das dadurch erreichen, daß wir das getriebene Flügelrad II möglichst nahe an das treibende Flügelrad I setzen. Denken wir uns nun an Stelle des porösen Rohres den Eisenring, welcher für die magnetischen Kraftlinien einen Kanal mit undichten Wandungen bildet, an Stelle des Flügelrades I die treibende Spule I und an Stelle des Flügelrades II die getriebene Spule II, so sehen wir, daß der durch diese Spule gehende magnetische Fluß der Wassergeschwindigkeit in Fig. 2 entspricht und um so kleiner sein wird, je größer die Stromstärke in II ist.

Die in Fig. 1 gezeichnete Anordnung eines Transformators ist also eine ungünstige, denn sie entspricht nur sehr unvollkommen dem Zweck, aus der getriebenen Spule einen möglichst

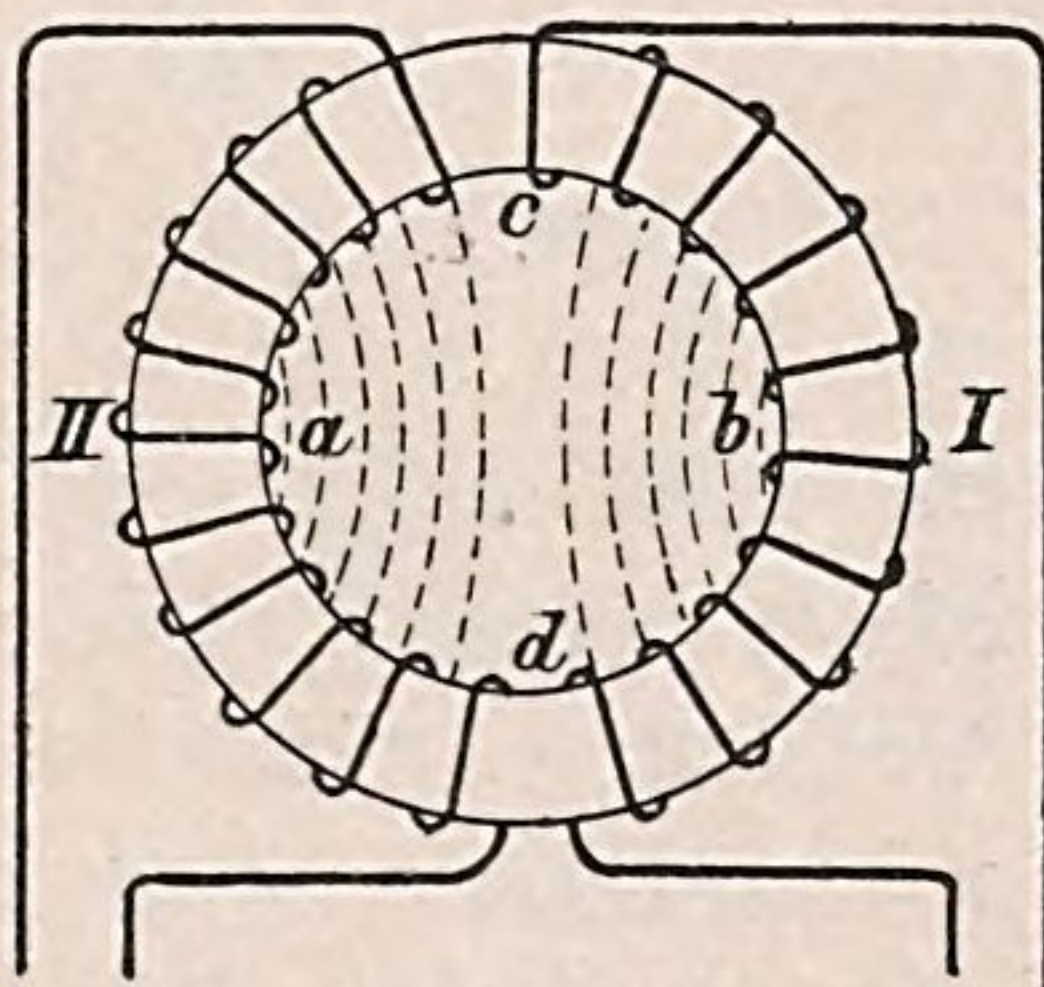


Fig. 3.

starken Strom unter möglichst hoher Spannung entnehmen zu können. Diesem Ziel kommen wir etwas näher, wenn wir die Spulen auf den ganzen Umfang des Ringes verteilen, so daß jede

Spule eine Ringhälfte vollständig bedeckt (Fig. 3.) Wie man sofort sieht, hat bei dieser Anordnung der magnetische Druck, welcher die Kraftlinien aus dem Eisenring herauszudrängen sucht, nicht mehr einen über die ganze Ringhälfte gleichen Maximalwert, sondern er hat diesen Wert nur in den Punkten c und d , nimmt zu beiden Seiten ab und ist in a und b Null. Das Streufeld ist also quantitativ kleiner, und durch die Verteilung desselben, sowie jene der Windungen wird sein nachteiliger Einfluß, verglichen mit der Anordnung Fig. 1, bedeutend vermindert.

Man kann die Verteilung des Streufeldes im Innern des Ringes annähernd graphisch darstellen, wenn man bedenkt, daß der magnetische Druck in irgend einem Punkte den bis zu diesem Punkte gezählten Ampèrewindungen proportional ist. Denken wir uns nun jede Ringhälfte gleichmäÙig bewickelt und die Stromrichtung derart, daß der Druck in dem linken oberen Quadranten die Richtung vom Eisen in die Luft und in dem linken unteren Quadranten die umgekehrte Richtung, also von der Luft in das Eisen, hat. Das Gleiche findet dann in den beiden rechts liegenden Quadranten statt. Denken wir uns nun den Ring in a aufgeschnitten und in eine Gerade ausgestreckt, so würde das Diagramm des magnetischen Druckes, welcher Streuung hervorbringt, die in

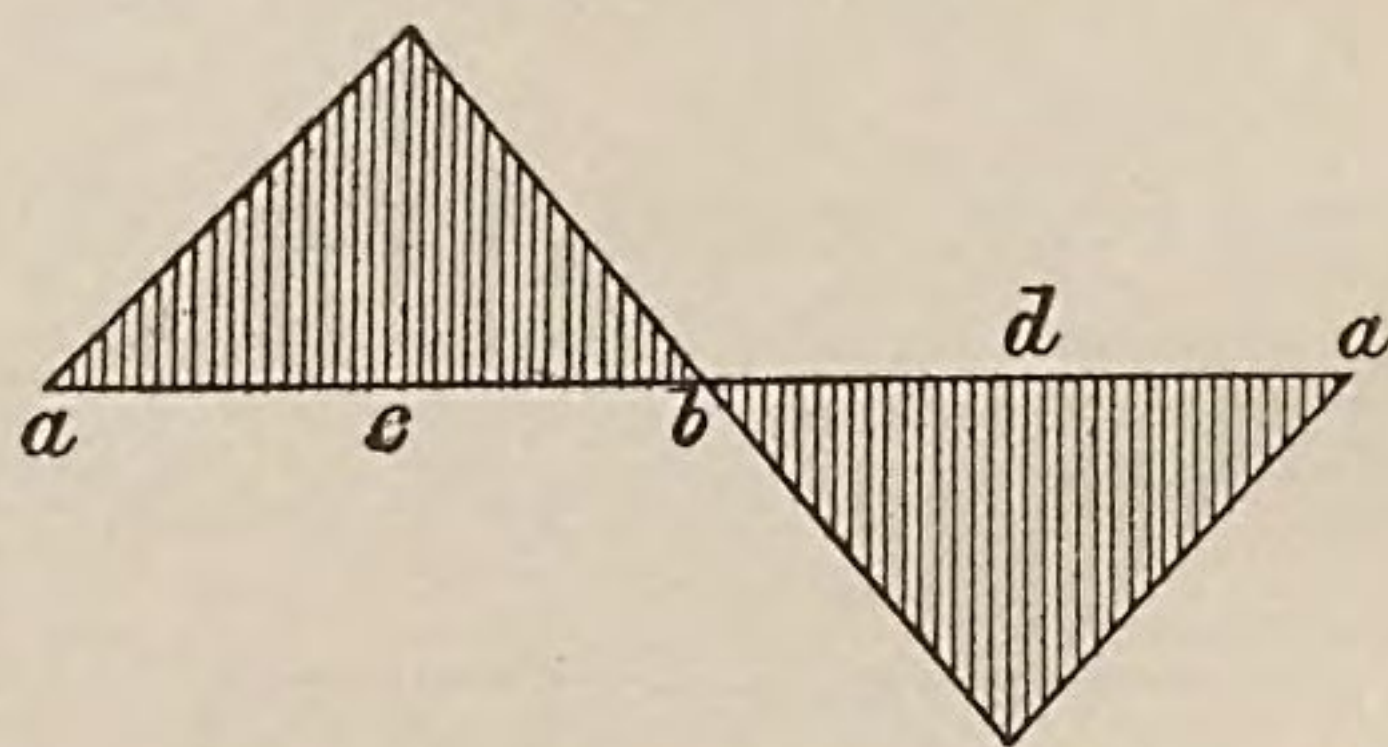


Fig. 4.

Fig. 4 dargestellte Form haben. Positive Ordinaten bedeuten einen Druck aus dem Eisen heraus, also nördliche Polarität des Eisens; und negative Ordinaten südliche. In Fig. 3 sind die Kraftlinien, welche durch die Luft gehen, punktiert gezeichnet, jedoch nur für den Innenraum des Ringes. Außerdem gehen natürlich Streulinien auch durch den ganzen Luftraum außerhalb des Ringes. Wenn wir nun als eine ganz rohe Annäherung die Annahme machen, daß der magnetische Widerstand längs jeden Pfades der gleiche ist, d. h. daß die aus der Flächeneinheit des

Ringes austretende bzw. die in die Flächeneinheit eintretende Anzahl Kraftlinien dem magnetischen Druck an der betreffenden Stelle proportional ist, so würde die gesamte Streuung durch die schraffierten Flächen in Fig. 4 dargestellt. Die Annahme eines konstanten magnetischen Widerstandes ist allerdings nicht richtig. Da es sich aber vorläufig nur um eine ganz oberflächliche Betrachtung handelt, so brauchen wir auf die Frage, wie der magnetische Widerstand variiert, nicht näher einzugehen und können annehmen, daß die Flächen in Fig. 4 das Streufeld darstellen.

Anordnung der Spulen. Denken wir uns nun die Wicklung derart geändert, daß wir nicht zwei halbkreisförmige Spulen erhalten, sondern sechs Spulen, deren jede ein Sechstel des

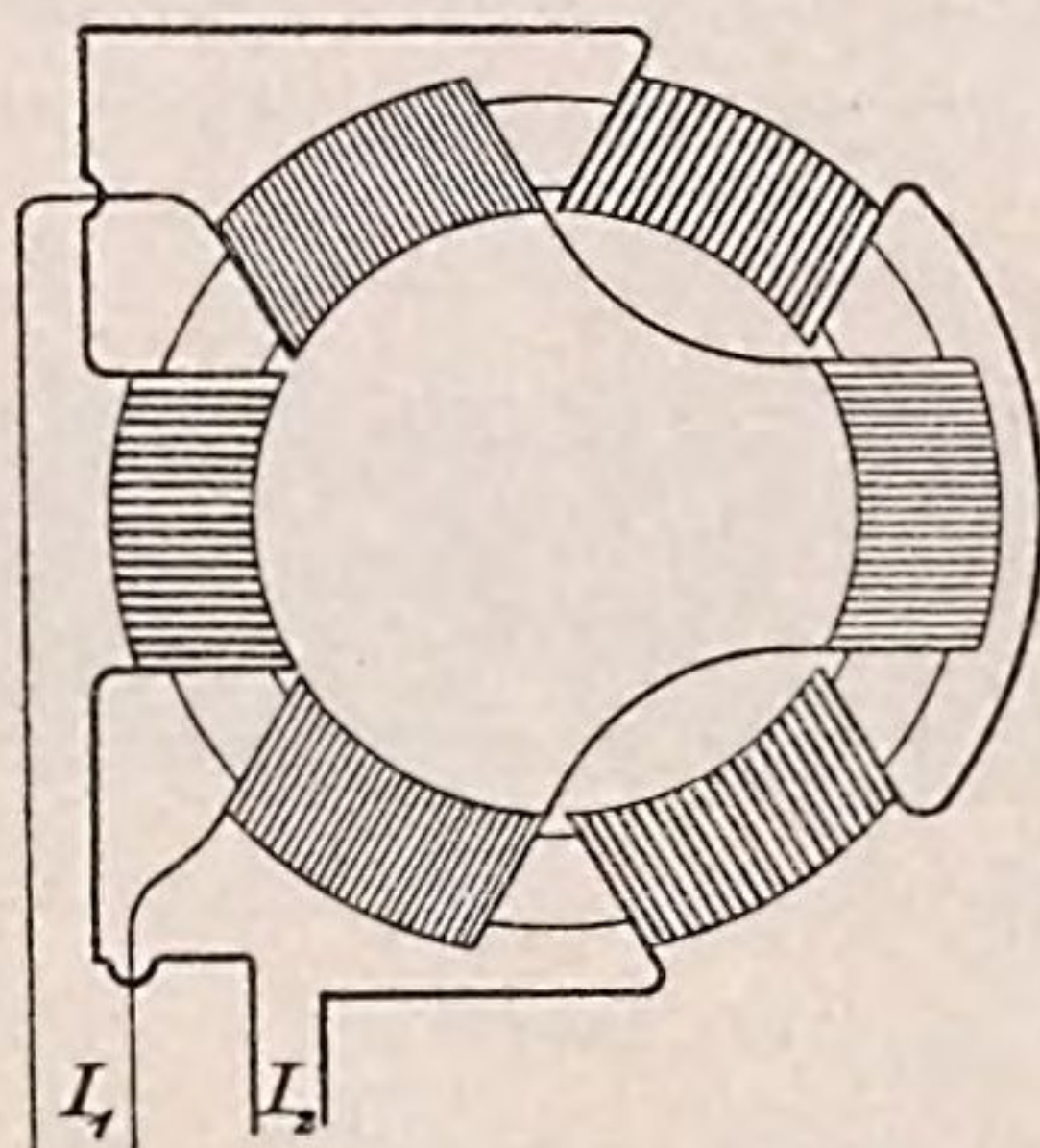


Fig. 5.

Ringes bedeckt und die so angeordnet sind, daß je eine Primärspule zwischen zwei Sekundärspulen liegt (Fig. 5), so wird dadurch die magnetische Streuung bedeutend vermindert. Der größte magnetische Druck liegt wie früher an den Berührungsstellen der Primär- und Sekundärspulen; da jedoch die Anzahl Windungen in jeder Spule auf ein Drittel reduziert ist, so ist dieser Maximalwert auch auf ein Drittel des früheren Wertes reduziert. Gleichzeitig ist die Oberfläche, durch welche Streulinien austreten können, auf ein Drittel reduziert. Das gesamte Streufeld beträgt mithin nur $\frac{1}{3} \times \frac{1}{3} = \frac{1}{9}$ des früheren Wertes. Hätten wir jede Wicklung in 4 anstatt in 3 Teile geteilt, so wäre, wie man sofort sieht, das Streufeld auf $\frac{1}{16}$ des Wertes gesunken, den es bei der Anordnung Fig. 3 hat. Es ist also möglich, durch genügende Unterteilung der Wicklung das Streufeld beliebig zu verkleinern, und es könnte ganz vermieden werden, wenn die Unterteilung so weit

durchgeführt wird, daß die einzelnen Primär- und Sekundärwindungen ineinander gelegt werden. Das ist nun mit Rücksicht auf gute Isolierung der beiden Stromkreise von einander nicht ausführbar und es ist auch für praktische Zwecke nicht nötig; denn die Erfahrung hat gezeigt, daß bei einer Unterteilung, bei welcher etwa 500 bis 600 effektive Ampèrewindungen auf jede Teilspule kommen, die Streuung ganz unbedeutend ist.

Es ist natürlich nicht notwendig, daß man den Eisenkern in der Form eines Kreisringes herstellt. Jede geschlossene Figur kann verwendet werden. Man könnte also z. B. das die beiden Spulen verkettende magnetische Zwischenglied in der Form eines rechteckigen Rahmens herstellen (Fig. 6) und die Spulen auf die längeren Seiten bringen. Die links gezeichnete Anordnung entspricht Fig. 3. Wir haben nur eine Primärspule und eine Sekundär-

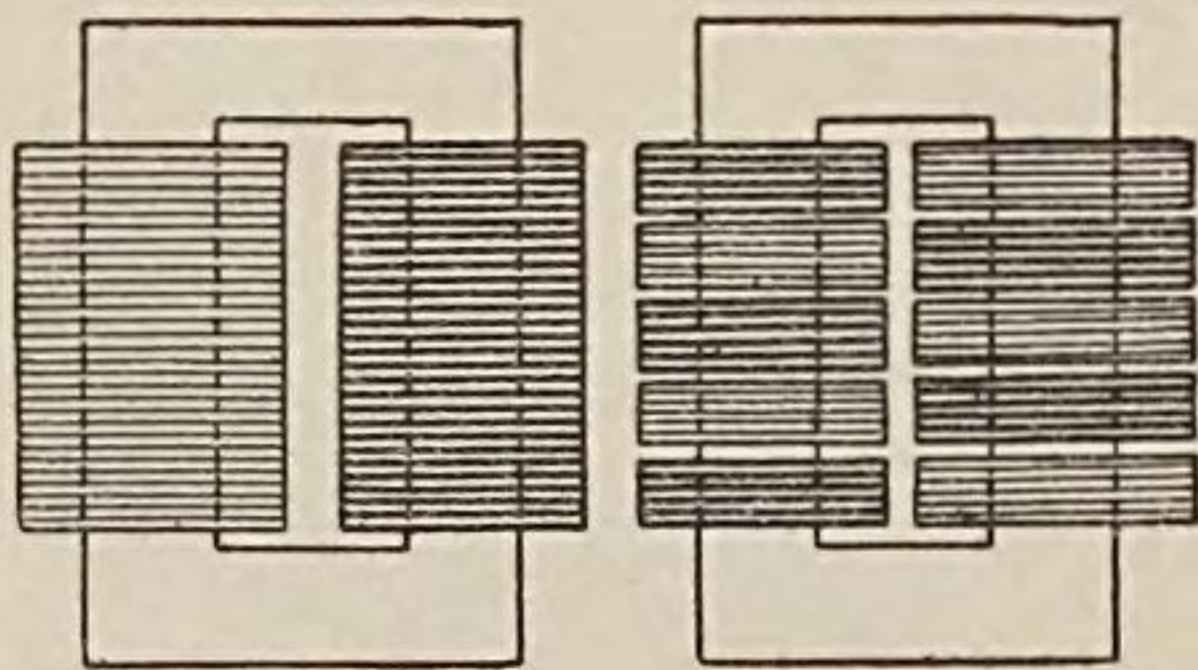


Fig. 6.

spule. Dabei würde die Streuung sehr bedeutend sein. Bei der rechts gezeichneten Anordnung haben wir 5 Primärspulen und 5 Sekundärspulen, und die Streuung würde dadurch auf ungefähr den 25. Teil reduziert werden.

Schließlich können wir auch die Spulen nicht nebeneinander, sondern ineinander anordnen und dadurch die Streuung auf ein sehr bescheidenes Maß bringen. Diese Anordnung wird sehr viel angewendet, weil sich dabei die Spulen gut gegeneinander isolieren lassen.

Ableitung der Grundgleichung. Es wurde schon am Anfang dieses Kapitels erwähnt, daß die in einer Drahtspule induzierte EMK proportional ist der Anzahl Windungen n und dem Grad der Änderung, welchen der durch die Spule gehende magnetische Fluß N der Zeit nach genommen erfährt. Es ist

also $E = n \frac{dN}{dt}$, und um die in jedem Augenblicke wirkende EMK berechnen zu können, müssen wir wissen, in welcher Beziehung

N zur Zeit t steht. Nun wird der magnetische Fluß N durch die magnetisierende Wirkung der Primärspule erzeugt, und wenn die Magnetisierung innerhalb jener Grenzen bleibt, für welche die Permeabilität als konstant angenommen werden kann, so ändert sich N proportional mit dem Primärstrom. Dabei nehmen wir vorläufig an, daß die Sekundärspule offen ist, also kein Strom durch dieselbe fließt. Bei Transformatoren muß nun schon mit Rücksicht auf Erwärmung und Wirkungsgrad die Induktion mäßig gehalten werden, und wir können somit annehmen, daß die Permeabilität konstant bleibt und die Feldstärke N der Stärke des dieselbe induzierenden Stromes proportional ist. Es treten allerdings gewisse Nebenwirkungen auf, welche dieses Verhältnis trüben; wir wollen dieselben jedoch vorläufig außer Acht lassen. Wir wollen auch annehmen, daß der erregende Strom von einer Maschine geliefert wird, deren EMK-Wellen durch eine Sinuskurve dargestellt werden können. Obwohl beide Annahmen der Wirklichkeit im allgemeinen nicht entsprechen, sind, wie später gezeigt werden soll, die auf dieser Grundlage abgeleiteten Gleichungen doch praktisch verwendbar.

Denken wir uns also eine Drahtwindung, deren Fläche s sei, von einem Kraftlinienfluß durchsetzt, der periodisch zwischen den Maximalwerten $+N$ und $-N$ schwankt, wobei der Maximalwert der Induktion $\mathfrak{B} = N:s$ ist. Die Zeit, welche zu einem vollen Kreislauf von $+N$ nach $-N$ und zurück nach $+N$ nötig ist, nennen wir die Zeit einer Periode T und die Anzahl in einer Sekunde durchlaufener Perioden nennen wir die Periodenzahl ∞ , so daß $T = \frac{1}{\infty}$. Da die EMK nur von der Änderung des Feldes, nicht aber von der Richtung seiner Kraftlinien abhängt, können wir das hin- und herwogende Feld uns ersetzt denken durch ein konstantes und homogenes Feld, welches ∞ mal in der Sekunde um eine auf seinen Kraftlinien senkrecht stehende Axe rotiert, die in der Ebene der Drahtspule liegt. Oder wir können uns das konstante und homogene Feld, dessen Induktion $\mathfrak{B}$ ist, im Raum als stillstehend denken und die Windung um eine in ihrer Ebene liegende und auf den Kraftlinien des Feldes senkrecht stehende Axe rotierend denken. Die induzierte EMK bleibt dabei dieselbe, als wenn die Windung stillsteht und das Feld nach einem Sinusgesetz durch sie hindurch hin- und herwogt. Es sei in Fig. 7

O die Rotationsaxe und α der Winkel, den die Ebene der Windung zur Zeit t mit der Horizontalen einschließt. Sind die Kraftlinien des Feldes vertikal nach aufwärts gerichtet, und rotiert die Windung in der Richtung des Uhrzeigers, so wird in dem oberen Drahte der Windung eine EMK induziert, welche gegen den Beschauer gerichtet ist, und im unteren Drahte eine EMK, welche

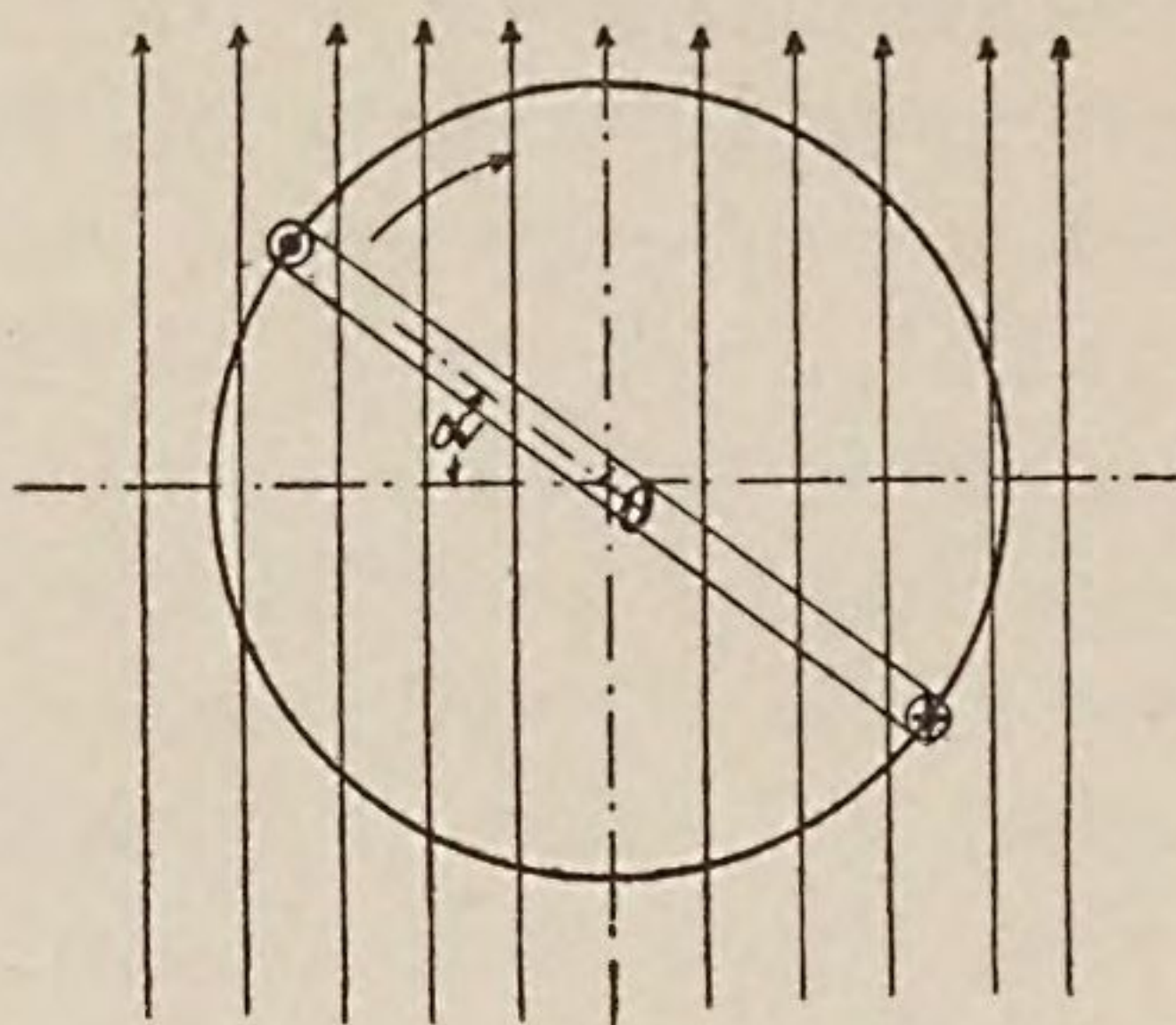


Fig. 7.

entgegengesetzt gerichtet ist. Die Richtung zeigen wir in der Figur durch einen Punkt bzw. ein kleines Kreuz an. Diese Zeichen sollen die Spitze bzw. die Federn eines Pfeiles vorstellen, welcher in der Richtung der EMK oder des Stromes fliegt. Bei einem Strome, welcher gegen den Beschauer fließt, sieht er die Spitze des Pfeiles, bei einem von ihm fortfließenden Strome die Federn.

Ist ω die Winkelgeschwindigkeit der Drahtwindung, so ist $\alpha = \omega t$; und da die Windung in der Sekunde ∞ Umdrehungen macht, ist $\omega = 2\pi \infty$ und $\alpha = 2\pi \infty t$. Der durch die Windung gehende magnetische Fluß ist in diesem Augenblicke $N \cos \alpha$ und der Grad seiner Abnahme ist $-\frac{dN \cos \alpha}{dt} = N \sin \alpha \frac{d\alpha}{dt}$.

Nun ist $\frac{d\alpha}{dt} = 2\pi \infty$ und mithin der augenblickliche Wert der induzierten EMK:

$$E = 2\pi \infty N \sin \alpha.$$

Das gilt für eine Windung. Sind n Windungen in Serie geschaltet, so ist der Wert n mal so groß. Wir haben also für eine Spule von n Windungen

$$E = 2\pi \infty N n \sin \alpha$$

in absolutem Maße. Wollen wir die EMK in Volt erhalten, so müssen wir diesen Ausdruck noch mit 10^{-8} multiplizieren. Steht die Spule horizontal, also senkrecht auf den Kraftlinien, so ist der magnetische Fluß durch die Spule ein Maximum und die EMK gleich Null. Steht die Spule vertikal, d. h. parallel zu den Kraftlinien, so ist der durch sie gehende magnetische Fluß gleich Null und die induzierte EMK ein Maximum, nämlich

$$E = 2\pi \simeq N n 10^{-8}.$$

Der augenblickliche Wert der EMK ist somit

$$E_t = E \sin \alpha, \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (1)$$

wobei wir jetzt ihren Maximalwert mit E bezeichnen, und jener des magnetischen Flusses oder der Feldstärke

$$N_t = N \cos \alpha.$$

Es findet also zwischen Feldstärke und EMK eine Verschiebung statt, deren Zeitdauer die Zeit einer Viertelperiode ist. Denken wir uns nun die Enden der Spule mit einer Glühlampe verbunden, deren Widerstand W sei, so würde durch die Lampe ein Strom fließen, dessen Maximalwert $I = \frac{E}{W}$ und dessen augenblicklicher Wert $I_t = I \sin \alpha$ ist. Bekanntlich ändert sich der Widerstand des Kohlenfadens mit seiner Erwärmung, d. h. mit der Stromstärke. Da letztere jedoch sehr schnellen Änderungen unterworfen ist und die Temperatur des Kohlenfadens wegen seiner Masse diesen Änderungen nicht folgen kann, sind wir berechtigt, W als konstant anzunehmen. Denken wir uns ferner die gleiche Lampe durch Gleichstrom betrieben und auf dieselbe Helligkeit gebracht, so muß die in beiden Fällen verbrauchte (d. h. in Wärme umgesetzte) elektrische Arbeit dieselbe sein. Wir haben dann bei Wechselstrom den gleichen Effekt wie bei Gleichstrom und können so den effektiven Wert des Wechselstroms durch Vergleichung mit einem Gleichstrom bestimmen. Da $I_t = I \sin \alpha$, so können wir den augenblicklichen Wert des Wechselstroms in einem Vektordiagramm durch die Projektion eines mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega = 2\pi \simeq$ rotierenden Vektors darstellen, dessen Länge nach einem beliebig gewählten Maßstabe den Maximalwert I der Stromstärke darstellt. Die gesamte, während einer Umdrehung des Vektors (also in der

Zeit T) vom Strome geleistete Arbeit kann nun gefunden werden, indem wir uns den Vektor in einer genügend grofsen Anzahl von Stellungen, die alle um ein kleines Zeitintervall Δt von einander entfernt sind, eingezeichnet denken, die Projektionen der Vektoren durch Abmessung bestimmen, die entsprechenden Werte quadrieren und die Summe bilden $\sum I_t^2 W \Delta t$, wobei $I_t = I \sin \alpha$ ist. Nun können wir uns diese Operation zweimal vorgenommen denken, was natürlich die Arbeit doppelt geben würde. Wir können bei dieser doppelten Summierung auch die Vektoren paarweise anordnen, so dafs die zu einem Paar gehörigen Vektoren um 90° entfernt sind. Die Glieder der zu summierenden Reihe erhalten dann folgende Form (vergl. Fig. 8)

$$W (I^2 \sin^2 \alpha + I^2 \cos^2 \alpha) \Delta t = W I^2 \Delta t.$$

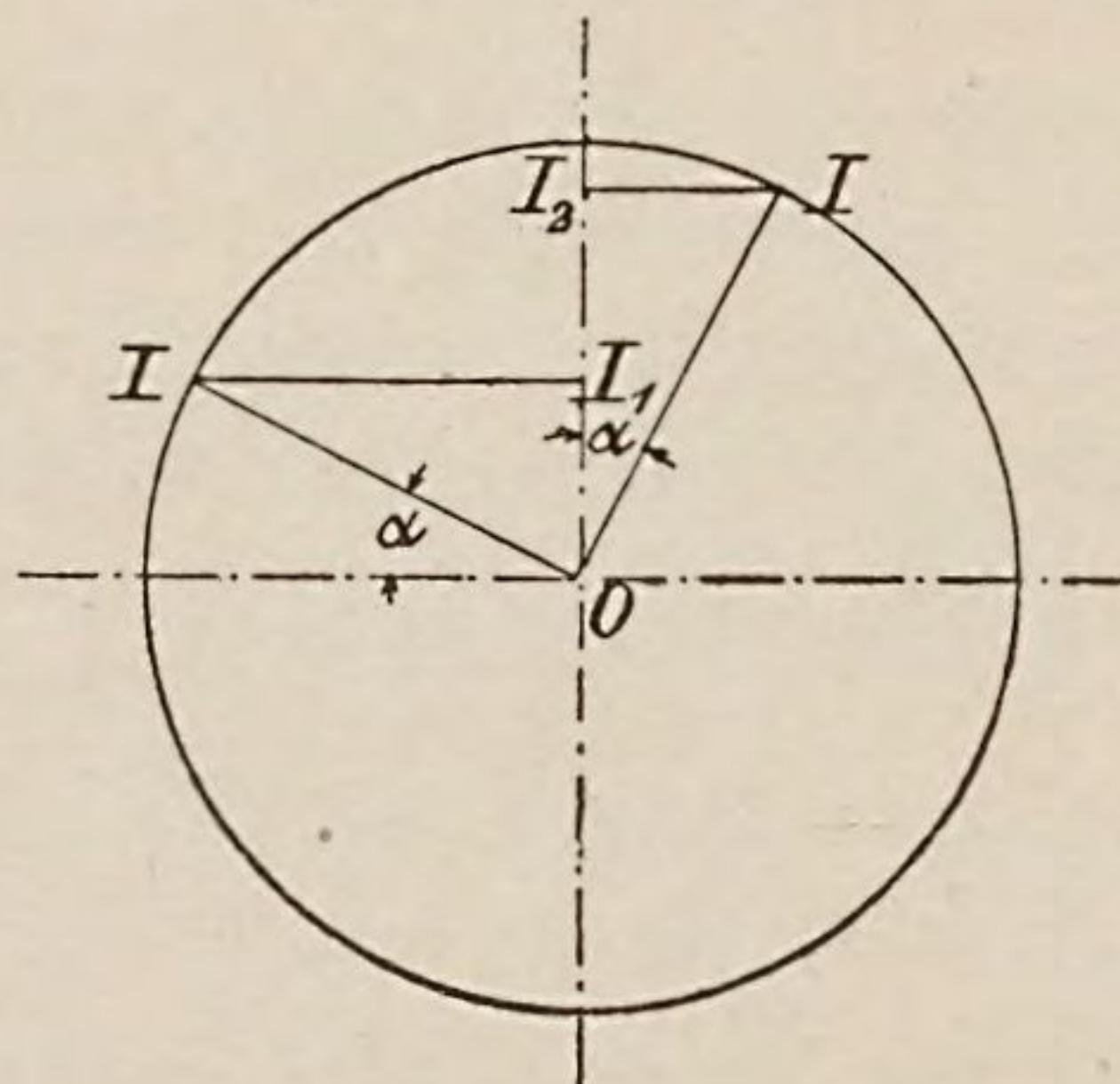


Fig. 8.

Da alle anderen Glieder der Reihe den gleichen Wert haben, so ist die Summe durch den Ausdruck $m W I^2 \Delta t$ gegeben, wobei m die Anzahl der Glieder, also gleich $T : \Delta t$ ist. Wir erhalten somit für die Arbeit A :

$$A = \frac{W I^2 T}{2}.$$

Da diese Arbeit in der Zeit T geleistet wird, ist der Effekt

$$P = \frac{W I^2}{2}.$$

Dieser durch den Wechselstrom vom Maximalwerth I erzielte Effekt soll obiger Voraussetzung gemäß gleich sein dem Effekt eines Gleichstromes, den wir mit i bezeichnen wollen. Es ist dann

i der effektive Wert des Wechselstromes und seine Beziehung zu dem Maximalwerte I ist gegeben durch die Gleichung

$$\frac{WI^2}{2} = Wi^2$$

$$i = \frac{I}{\sqrt{2}} \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \cdot \quad (2)$$

Diese Beziehung gilt natürlich nur, wenn die Stromstärke eine Sinusfunktion der Zeit ist. Ändert sich die Stromstärke nach einem anderen Gesetz, so wird die Beziehung zwischen ihrem Maximalwert und ihrem effektiven Wert nicht durch $\sqrt{2}$, sondern einen anderen Koeffizienten ausgedrückt, der eben von der Form der Stromkurve abhängt. Allgemein hat man, wenn I den augenblicklichen Wert des Stromes bedeutet,

$$A = \int_0^T I^2 W dt = T W i^2,$$

woraus

$$i = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2 dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (3)$$

Die effektive Stromstärke ist also die Quadratwurzel aus dem quadratischen Mittelwert des Stromes.

Eine gleiche Überlegung gilt für die Spannung an den Klemmen der Lampe und überhaupt für elektromotorische Kräfte. Da bei allen bei Wechselstrom in Betracht kommenden Instrumenten zur Messung der Spannung (Hitzdraht-Voltmeter, Elektrostatische Voltmeter, Dynamometrische Instrumente) die Wirkung dem Quadrate der Spannung proportional ist, so ist die durch das Instrument angezeigte effektive Spannung die Quadratwurzel aus dem quadratischen Mittelwerte der Spannung

$$e = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T E^2 dt} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (4)$$

Verläuft die Spannung der Zeit nach derart, daß dieselbe durch eine Sinuslinie dargestellt werden kann, wobei die Abscissen Zeit und die Ordinaten Spannung bedeuten, so ist bei der Maximal-Spannung E die effektive Spannung:

$$e = \frac{E}{\sqrt{2}} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (5)$$

Wir haben früher gefunden, daß die maximale, in einer Spule von n Windungen induzierte EMK ist

$$E = 2\pi \simeq Nn 10^{-8} \text{ Volt,}$$

wobei $\simeq$ die Periodenzahl und N die maximale Zahl der durch die Spule gehenden Kraftlinien bedeutet. Durch Vergleich mit 5) finden wir somit die effektive EMK:

$$e = \frac{2\pi \simeq}{\sqrt{2}} Nn 10^{-8}$$

$$e = 4,44 \simeq Nn 10^{-8} \dots \dots \dots (6)$$

Dieses ist die Grundgleichung, nach der sich die effektive EMK in Transformatoren-Spulen berechnet. Dabei ist sinusartiger Verlauf der Strom- und Spannungskurven vorausgesetzt. Für andere Formen der Kurven wird die Gleichung später gegeben werden. Die Gleichung 6) gibt die EMK, welche in der Primärspule auftritt, wenn wir für n die Anzahl der Primärwindungen einsetzen. Diese Zahl soll in der Folge mit n_1 und die Windungszahl in der Sekundärspule mit n_2 bezeichnet werden.

Wir haben dann für die in beiden Spulen induzierten EM-Kräfte

$$e_1 = 4,44 \simeq Nn_1 10^{-8}$$

$$e_2 = 4,44 \simeq Nn_2 10^{-8},$$

wobei wir annehmen, daß die Feldstärke in beiden Spulen die gleiche ist, daß also magnetische Streuung nicht eintritt. Der Einfluß der Streuung wird später berücksichtigt werden.

Da der Strom in der Primärspule Arbeit leistet, muß die Richtung von e_1 im allgemeinen der Stromrichtung entgegengesetzt sein. Die Sekundärspule gibt Arbeit ab und ist deshalb die Richtung von e_2 im allgemeinen dieselbe wie jene des Sekundärstromes. Die aufgenommene oder abgegebene Energie kann jedoch nicht ohne Weiteres als das Produkt von Spannung und Strom betrachtet werden, weil in den meisten Fällen zwischen beiden eine Phasenverschiebung besteht; d. h. der Strom erreicht seinen Maximalwert zu einer anderen Zeit als die Spannung und Strom und Spannung gehen zu verschiedenen Zeiten durch Null. In der Primärspule ist also das Produkt aus den augenblicklichen Werten von Strom und EMK nicht immer negativ, sondern wird auch zeitweilig positiv. Ebenso ist dieses Produkt in der Sekundärspule nicht immer positiv, sondern wird auch zeitweilig negativ.

Die wirklich während einer Periode geleistete Arbeit ist also kleiner als das Produkt $T e_2 i_1$ bzw. $T e_2 i_2$.

Die Bestimmung der wirklichen Arbeit bzw. der effektiven Energie eines Wechselstromes ist im vierten Kapitel näher erläutert.

Zweites Kapitel.

Verluste in Transformatoren. — Einfluß der Spannungskurve auf den Hysteresisverlust. — Einfluß der Kern- und Spulenform auf die Verluste. — Kern- und Manteltransformatoren.

Verluste in Transformatoren. Die in Transformatoren auftretenden Verluste sind verschiedener Art. Wir haben zunächst den durch ohmschen Widerstand in den Spulen erzeugten Verlust, die sogenannte »Stromwärme«. Die Berechnung dieses Verlustes ist einfach und braucht nicht näher erläutert zu werden. Außerdem können noch durch Wirbelströme in den Leitern oder anderen metallischen Teilen des Transformators Verluste auftreten. Die Berechnung derselben ist sehr schwierig und zum Teil unmöglich; dagegen ist es sehr leicht, durch geeignete Konstruktion diese Verluste auf ein so geringes Maß zu beschränken, daß sie ohne Fehler vernachlässigt werden können. Schließlich haben wir die Verluste im Eisenkörper des Transformators zu berücksichtigen und diese werden durch zwei Ursachen hervorgerufen, erstens durch Hysteresis und zweitens durch Wirbelströme.

Durchläuft die Induktion in einem Eisenkörper einen vollen Cyklus von $+\mathfrak{B}$ durch 0 zu $-\mathfrak{B}$ und zurück durch 0 zu $+\mathfrak{B}$, so wird eine gewisse Menge Arbeit in Wärme umgesetzt und diese Arbeitsmenge ist abhängig von der Qualität des Eisens und der Induktion und ist dem Gewicht des Eisens und der Periodenzahl direkt proportional. Dabei ist es ganz gleichgültig, ob die Kurve, welche die Induktion als eine Funktion der Zeit darstellt, eine Sinuskurve ist oder nicht. Wenn in jeder halben Periode nur ein Maximum der Induktion vorkommt, so ist die Hysteresisarbeit nur von diesem Maximum abhängig, gleichviel auf welchem Wege es erreicht wird. Nach Steinmetz ist die Hysteresisarbeit per Periode und per Gewichtseinheit Eisen gegeben durch einen Ausdruck von der Form

$$A = h \mathfrak{B}^{1,6},$$

wobei h ein Koeffizient ist, welcher von der Qualität des Eisens und der gewählten Gewichtseinheit abhängt.

Die durch das Eisen hin- und herwogende Induktion erzeugt in der Masse des Eisens selbst EM-Kräfte, welche zur Bildung von Wirbelströmen Veranlassung geben. Nehmen wir an, der Querschnitt des Eisenkernes sei rechteckig und die Seiten haben die Dimensionen a und δ , so daß a die Breite und δ die Dicke des Kernes ist. Denken wir uns, daß die Breite konstant bleibt und die Dicke δ variiert wird. Es ist zunächst klar, daß die EMK am äußeren Umfange des Rechteckes ein Maximum sein wird. Dieses Maximum ist der gesamten Kraftlinienzahl, also $a \delta \mathfrak{B}$ proportional. Für einen gegebenen Wert von $\mathfrak{B}$ ist also die EMK nahe an der äußeren Haut des Eisenkernes $a \delta$ proportional, und das Gleiche gilt von den kleineren Werten der EM-Kräfte, welche tiefer in der Masse des Metalles herrschen. Die erzeugten Ströme sind dem Widerstande umgekehrt proportional, d. h. je größer δ bei gleicher Breite a , um so kleiner der Widerstand und um so größer die Ströme. Bei Vergrößerung von δ steigen also die EM-Kräfte, welche Wirbelströme erzeugen, im einfachen Verhältnis und die Wirbelströme selbst im quadratischen Verhältnis mit δ . Die aufgewendete Arbeit ist demnach der dritten Potenz von δ proportional. Bei runden Kernen ist die EMK dem Quadrate des Kerndurchmessers proportional und der Widerstand ähnlicher Schichten von demselben unabhängig. Es wächst also die Stromstärke im quadratischen Verhältnis mit dem Kerndurchmesser und die verbrauchte Arbeit mit seiner vierten Potenz. Um nun den Arbeitsverlust möglichst gering zu halten, verwendet man nicht solide Kerne, sondern setzt sie aus Blechen oder Drähten zusammen. Im ersten Falle ist der Verlust der dritten Potenz der Blechdicke proportional und im zweiten der vierten Potenz des Drahtdurchmessers. Bei Verwendung von Blechen kann man somit durch Verminderung der Blechdicke auf die Hälfte oder ein Drittel den Verlust auf $\frac{1}{8}$ bzw. $\frac{1}{27}$ vermindern. Man könnte also durch Anwendung genügend dünner Bleche den Verlust überhaupt verschwindend klein machen. Man darf jedoch in dieser Richtung nicht zu weit gehen, weil die Kosten des Transformators sonst zu groß würden und zu viel Raum für die Isolation der Bleche von einander verloren gehen würde. Man begnügt sich deshalb, mit der Unterteilung des Eisens so weit zu

gehen, daß die Verluste durch Wirbelströme, wenn auch nicht ganz verschwinden, so doch unerheblich werden. Es hat sich in der Praxis herausgestellt, daß eine Blechstärke von 0,35 bis 0,5 mm noch ganz gut zulässig ist. Die dünneren Bleche werden bei höheren Periodenzahlen bis etwa 100, und die dickeren bei niedrigeren Periodenzahlen von ungefähr 50 verwendet. Für sehr niedrige Periodenzahlen und schwache magnetische Beanspruchung des Eisens kann man auch noch dickere Bleche als 0,5 mm verwenden. Wie weit man in dieser Beziehung gehen kann, möge an einem Beispiel erläutert werden. Nehmen wir an, daß wir bei einer gewissen Qualität Eisen durch praktische Erfahrungen festgestellt haben, daß bei $\omega = 50$ und $\mathfrak{B} = 4000$ 0,5 mm Blechdicke ganz gut zulässig sei. Nun sei ein Transformator für $\omega = 20$ und $\mathfrak{B} = 3000$ zu konstruieren. Was ist die größte zulässige Blechdicke, bei welcher die Verluste durch Wirbelströme per Kilogramm Eisen den gleichen Wert haben wie früher? Im früheren Falle war die EMK, welche Wirbelströme erzeugte, dem Produkt $\mathfrak{B} \omega = 200\,000$ proportional. Bei Anwendung gleich dicker Bleche würde sie im neuen Transformator dem Produkte $\mathfrak{B} \omega = 60\,000$ proportional sein, also nur das 0,3 fache betragen. Da die Verluste dem Quadrate der EMK proportional sind, würden sie jetzt nur das 0,09 fache des früheren Wertes ausmachen. Wollen wir nun den gleichen Verlust zulassen, so können wir die Blechdicke in

dem Verhältnis $\sqrt[3]{\frac{1}{0,09}} = 2,22$ vergrößern. Wir können also

Bleche von 1,11 mm Dicke anwenden. Verwendet man nun, wie das in der Praxis immer geschieht, so dünne Bleche, daß der Wirbelstromverlust unwesentlich ist, so braucht man ihn nicht gesondert zu berechnen, sondern kann ihn mit dem Hysteresisverlust zusammenfassen. Wenn man also die Verluste im Eisen unter Anwendung der üblichen Blechdicke, Periodenzahlen und Werten der Induktion experimentell bestimmt, so kann man die so erhaltenen Werte unmittelbar zur Berechnung der gesamten Eisenverluste in Transformatoren anwenden. Ich habe eine große Anzahl Messungen dieser Art, sowohl an fertigen Transformatoren als auch an Blechmustern, mittels eines besonders zu diesem Zwecke konstruierten Meßapparates (siehe siebentes Kapitel) gemacht und so die Abhängigkeit zwischen den Eisenverlusten und der

Induktion festgestellt. Die Bleche waren 0,4 bis 0,5 mm dick und die Periodenzahl schwankte zwischen 50 und 75. Da der Wirbelstromverlust unter allen Umständen nur einen kleinen Bruchteil des Gesamtverlustes ausmacht, so hat die Änderung der Periodenzahl zwischen den engen Grenzen 50 und 75 nur einen ganz unbedeutenden Einfluß auf den Gesamtverlust. Behufs bequemer Verwendung sind die bei den Messungen erhaltenen Werte auf

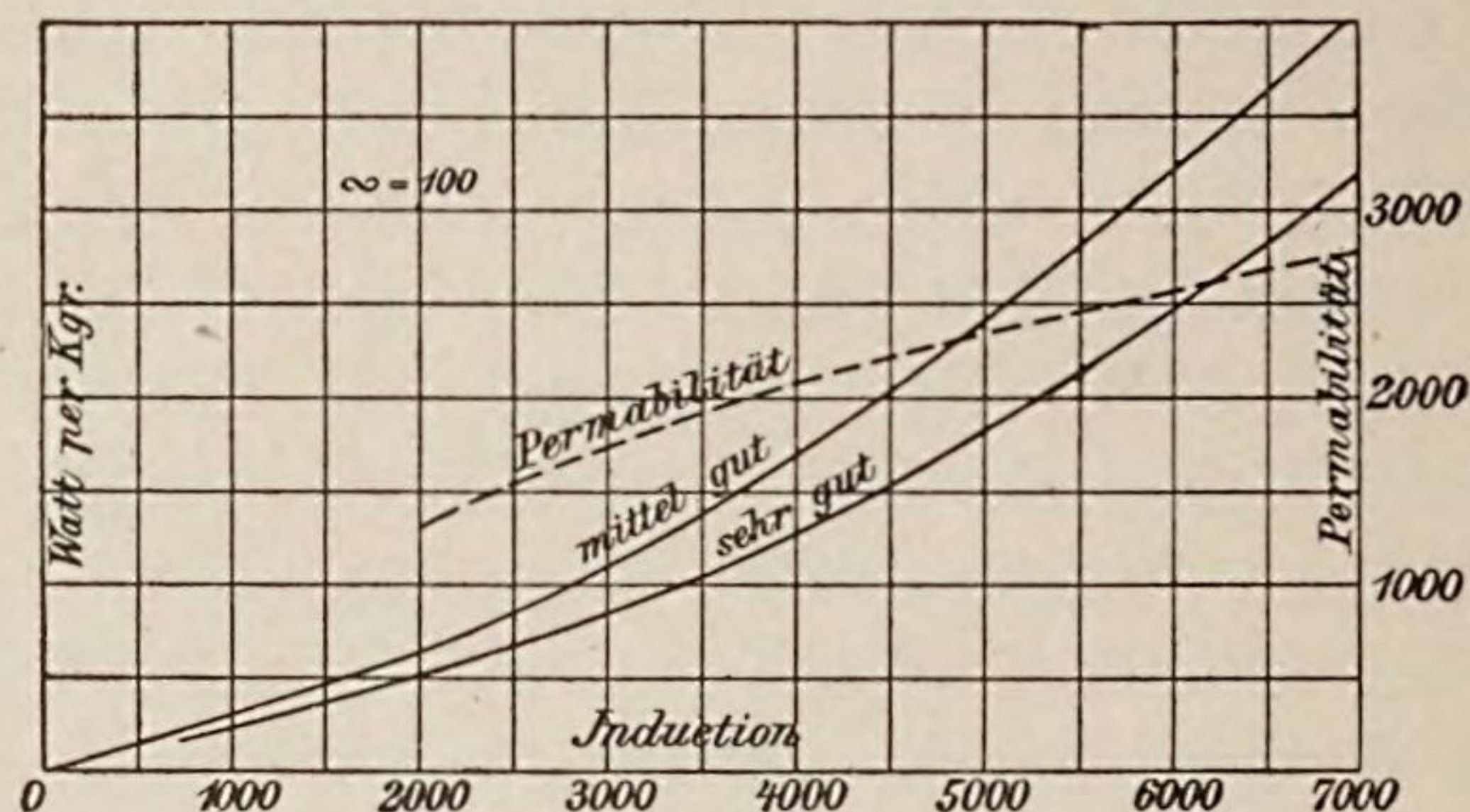


Fig. 9.

die Periodenzahl $\infty = 100$ umgerechnet und als Kurven in Fig. 9 eingetragen worden. Es sind zwei Kurven gegeben. Die obere für gewöhnliche Bleche mittelguter Qualität und die untere für Bleche sehr guter Qualität, die für Transformatoren besonders hergestellt werden. Die Abscissen bedeuten Induktion und die Ordinaten die gesamten Verluste (Hysteresis und Wirbelströme) in einem Kilogramm Eisen bei 100 Perioden. Für die Periodenzahl ∞ sind die Werte im Verhältnis von $\infty : 100$ umzurechnen. Außer den zwei Kurven für die Gesamtverluste enthält das Diagramm noch eine Kurve, welche die Permeabilität der Bleche als Funktion der Induktion darstellt. Diese Kurve ist durch Messung des Energieverlustes und Stromes bei Leerlauf an fertigen Transformatoren berechnet worden und ist für alle Eisensorten so ziemlich dieselbe. Die Methode zur Bestimmung der Permeabilität ist im vierten Kapitel behandelt.

Einfluß der Spannungskurve auf den Hysteresisverlust. Die Form der Kurve der EMK beeinflusst nicht nur das Verhältnis zwischen dem effektiven und dem maximalen Wert, sondern auch den Energieverlust durch Hysteresis. Nehmen wir zunächst an, daß die Induktion in jeder halben Periode nur einen Maximalwert hat, so ist der Hysteresisverlust durch diesen Wert

und die Periodenzahl bestimmt. Es ist dabei, wie schon erwähnt, die Form der Kurve, welche N als eine Funktion der Zeit darstellt, nicht von Einfluß, sondern bloß ihr höchster Punkt. Nun können wir uns verschiedene Formen der Kurve vorstellen, welche alle das gleiche Maximum erreichen, sonst aber in ihrem Verlaufe sehr verschieden sein mögen. In Bezug auf Hysteresisverlust sind alle diese Kurven gleichwertig, jedoch nicht in Bezug auf die induzierte EMK. Diejenige Kurve wird vorzuziehen sein, bei welcher die effektive EMK bei der gleichen Maximal-Induktion N den größten Wert hat. Nun ist aber die Induktion und mithin ihr Maximalwert von der Kurve der EMK abhängig und wir können mithin die Aufgabe uns folgendermaßen gestellt denken: Gegeben seien verschiedene Wechselstrommaschinen, die alle die gleiche effektive EMK erzeugen, bei denen jedoch die Kurve der EMK verschiedene Form hat. Zu bestimmen ist jene Form, bei welcher N , und mithin der Gesamtverlust im Eisen, ein Minimum wird.

Zur Lösung dieser Aufgabe ist es natürlich notwendig, daß wir verschiedene Formen der EMK-Kurve annehmen. Wir wählen dabei passend die Sinuskurve als den Ausgangspunkt der Untersuchung und sehen zu, welchen Einfluß eine Abänderung dieser Kurve in der einen oder anderen Weise sowohl auf das Verhältnis des effektiven zum maximalen Wert der EMK, als auch auf den maximalen Wert der Induktion hat. Die Sinuskurve kann in zwei Richtungen verändert werden; wir können sie entweder verflachen oder steiler, d. h. spitziger machen. Wenn wir mit der Verflachung bis an die theoretisch (allerdings nicht praktisch) mögliche Grenze gehen, so erhalten wir eine gebrochene Linie, die sich aus senkrechten und horizontalen Stücken zusammensetzt. Die senkrechten Stücke repräsentieren den plötzlichen Übergang von $-E$ nach $+E$, so daß die Länge der horizontalen Stücke gleich der Zeit einer halben Periode ist. Man könnte eine solche Kurve durch Commutation einer Gleich-EMK angenähert erhalten. Die Annäherung ist mit einer Wechselstrom-Maschine weniger gut zu erzielen und wir können deshalb eine so gestaltete EMK-Kurve als den äußersten, praktisch kaum erreichbaren Grenzfall der verflachten Sinuskurve ansehen. In diesem Falle ist

$$e = E$$

und da E konstant ist, muß $\frac{dN}{dt}$ auch konstant sein, d. h. die Kurve der Induktion muß durch eine Zickzack-Linie dargestellt werden, deren Spitzen genau über den vertikalen Teilen der EMK-Linie liegen (Fig. 10).

Aus der Figur ersieht man sofort, daß $\frac{dN}{dt} = \frac{4N}{T}$. Da für eine Windung $E = \frac{dN}{dt}$ und $e = E$, so ist

$$e = 4 \propto N 10^{-8} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad (7)$$

Folgt die EMK einer Sinuskurve, so ist, wie aus Gleichung 6) hervorgeht

$$e = 4,44 \propto N 10^{-8}.$$

Soll nun in beiden Fällen die effektive EMK dieselbe sein, so muß der Kraftlinienfluß bei der in Fig. 10 dargestellten Form der EMK-Kurve im Verhältnis von 4,44 zu 4 größer sein, als

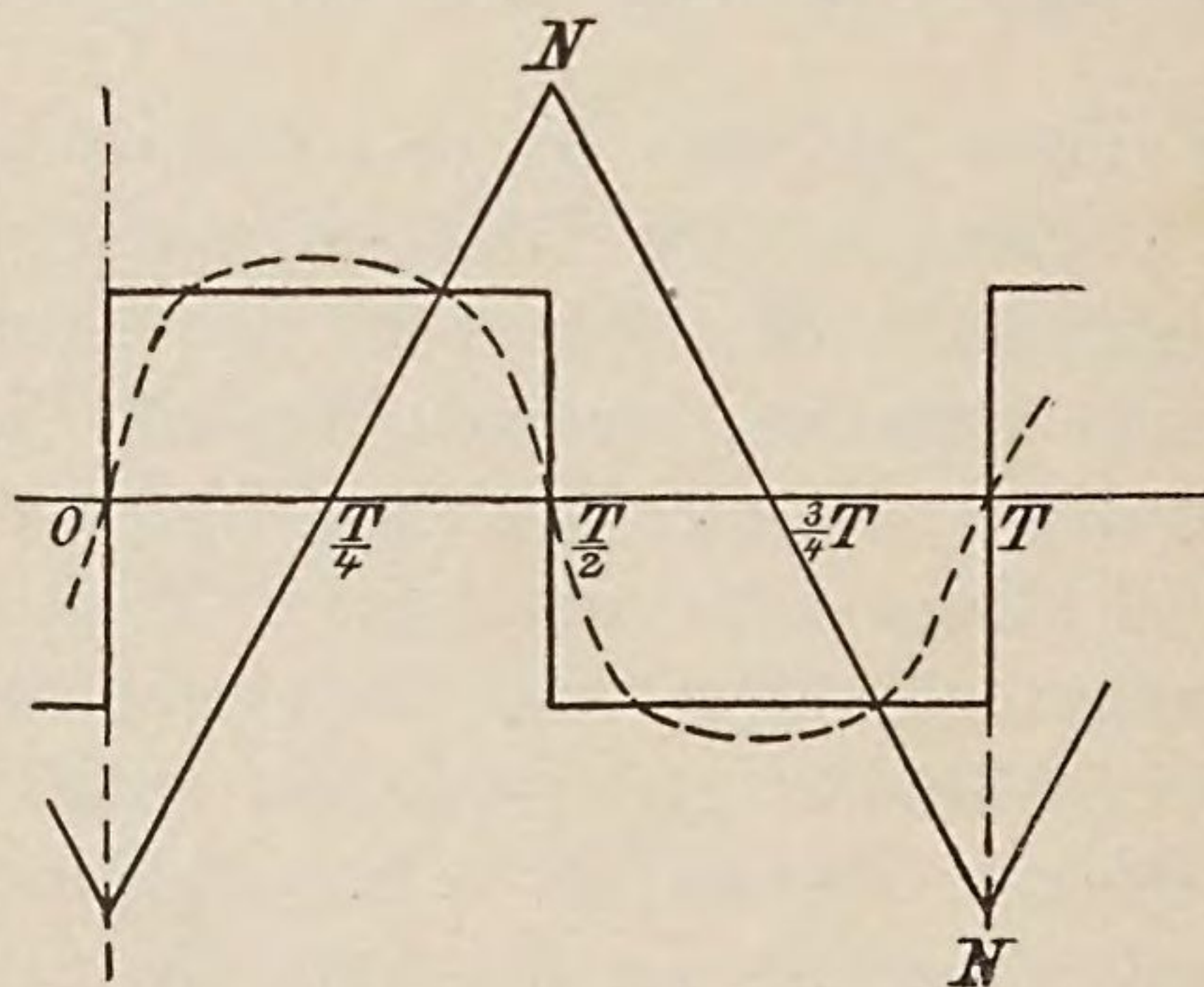


Fig. 10.

in dem Falle einer Sinuskurve. Es ist also der Eisenverlust um etwa 11% größer. Nun bildet, wie schon erwähnt, die in Fig. 10 dargestellte Kurvenform einen Grenzfall, der mit einer gewöhnlichen Wechselstrommaschine nicht erreicht wird. Die Kurve wird von der scharfen rechtwinkligen Form abweichen und mehr die durch die punktierte Linie dargestellte Form annehmen. Der Eisenverlust wird also nicht um die vollen theoretisch möglichen 11%, sondern um einen geringeren Betrag anwachsen. Immerhin zeigt die obige Betrachtung, daß eine EMK-Kurve von abgeflachter Form wegen der damit verbundenen Vergrößerung der Eisenverluste für Transformatoren ungünstig ist.

Wir wenden uns jetzt zur Untersuchung des anderen Falles, nämlich einer sehr spitzen EMK-Kurve. Dabei kann man nicht von vorn herein annehmen, daß die Zickzack- oder Dreieckform die Grenze bildet. Es gibt Maschinen, bei denen die Kurve der EMK durch eine Aufeinanderfolge von Dreiecken gebildet wird, deren Seiten nach innen gekrümmt sind, wo also die Spitze sehr steil ansteigt und E im Verhältnis zu e sehr groß ist. Nun ist aber die mathematische Untersuchung solcher Kurven der EMK kaum durchzuführen und für den gegenwärtigen Zweck auch wertlos, da es sich ja nur darum handelt, im allgemeinen festzustellen, ob eine spitze Kurvenform in Bezug auf die Eisenverluste in Transformatoren günstiger oder weniger günstig ist als die Sinusform. Wenn wir finden, daß die Dreieckform günstiger ist, so können wir ohne weiteres schließen, daß die übertriebene Dreieckform noch günstiger sein muß.

Es sei also E in Fig. 11 die Kurve der EMK, so ist zunächst die Kurve der Induktion dafür zu bestimmen. Da für eine Windung

$$E_t = \frac{dN}{dt}$$

in absoluten Einheiten ist, muß diese Kurve der Bedingung genügen, daß die trigonometrische Tangente in irgend einem zur

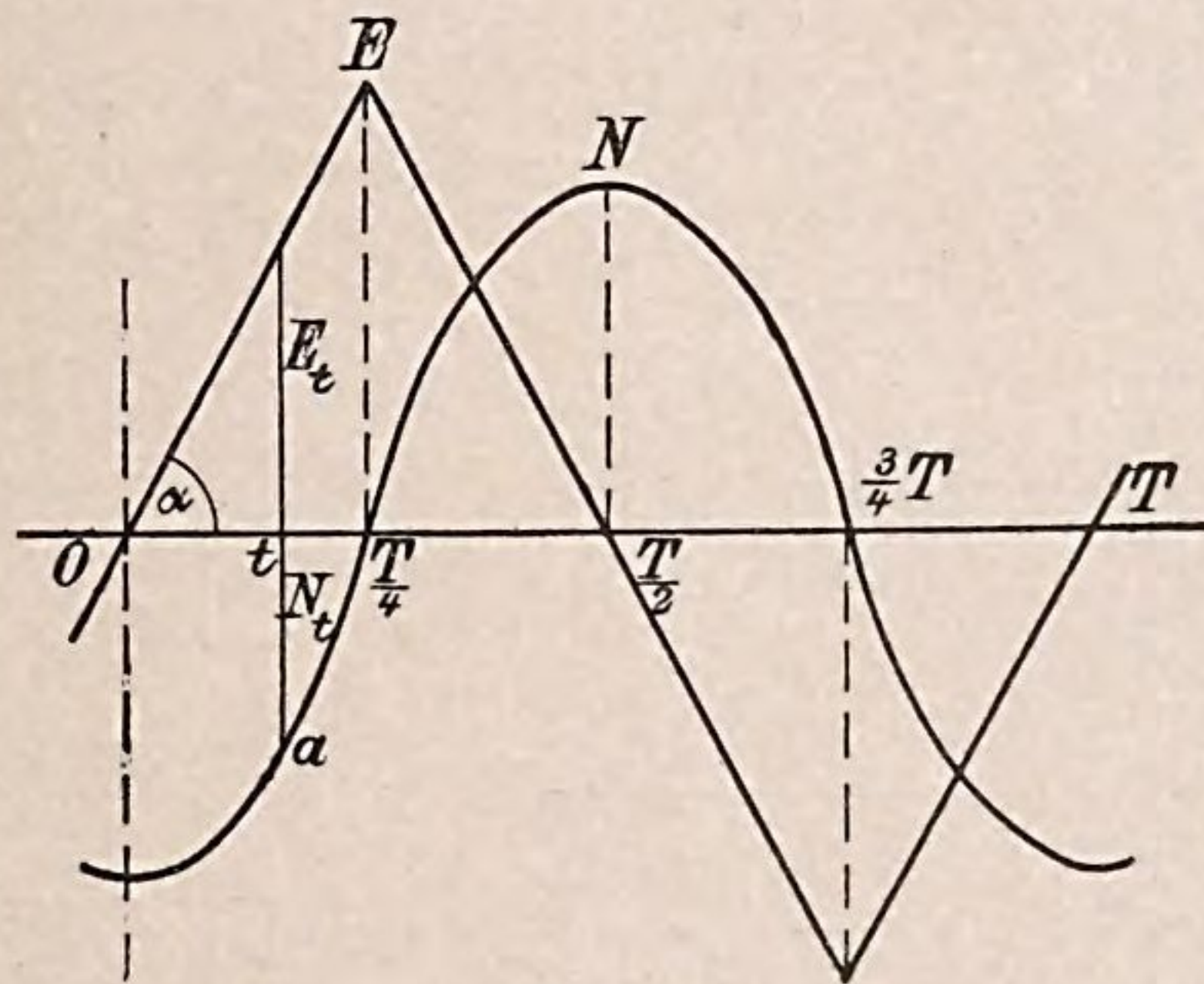


Fig. 11.

Abscisse t gehörigen Punkte a gleich ist der zu diesem Punkte gehörigen Ordinate der EMK-Kurve:

$$E_t = t \operatorname{tg} \alpha = - \frac{dN_t}{dt},$$

woraus

$$N_t = - \int t \operatorname{tg} \alpha dt + \text{Konst.}$$

$$N_t = \text{Konst.} - \frac{1}{2} t^2 \operatorname{tg} \alpha.$$

Die Konstante bestimmt sich aus der Überlegung, daß für $t = 0$ $N_t = N$ sein muß; es ist also

$$N_t = N - \frac{1}{2} t^2 \operatorname{tg} \alpha,$$

die Gleichung einer Parabel. Da $E = \frac{T}{4} \operatorname{tg} \alpha$, so ist

$$N_t = N - \frac{1}{2} t^2 \frac{4E}{T}.$$

Für $t = \frac{T}{4}$ muß $N_t = 0$ sein; woraus

$$N = \frac{1}{2} \left(\frac{T}{4} \right)^2 \frac{4E}{T},$$

$\frac{TE}{8} = N$ in absolutem Maße; und da $\frac{1}{T} = \infty$, so ist

$$E = 8 \infty N 10^{-8} \text{ Volt.}$$

Es ist also bei der Dreiecksform der Kurve und gleichem Kraftlinienfluß die maximale EMK genau doppelt so groß als bei der rechteckigen Kurvenform. Nun handelt es sich nicht um den maximalen Wert der EMK, sondern um den effektiven Wert. Dieser bestimmt sich für eine Viertelperiode wie folgt:

$$e = \sqrt{\frac{4}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} E_t^2 dt}$$

$$E_t = t \operatorname{tg} \alpha$$

$$e = \sqrt{\frac{4 \operatorname{tg}^2 \alpha}{T} \int_0^{\frac{T}{4}} t^2 dt} = \sqrt{\frac{4 \operatorname{tg}^2 \alpha}{T} \frac{1}{3} \frac{T^3}{64}}$$

$$e = \frac{T}{4} \operatorname{tg} \alpha \frac{1}{\sqrt{3}}$$

$$e = \frac{E}{\sqrt{3}} \text{ und } E = e \sqrt{3}.$$

Gleichzeitig soll die Länge jeder einzelnen Windung mit Rücksicht auf die Stromwärme möglichst klein sein. Diese sind Bedingungen, welche sich zum Teil widersprechen, und sie können daher einzeln nicht voll und ganz erfüllt werden.

Die beste Konstruktion muß einen Kompromiß zwischen diesen Bedingungen vorstellen und kann deshalb nur dadurch erhalten werden, daß man den Einfluß von Abänderungen in den Dimensionen und Windungsverhältnissen Schritt für Schritt bestimmt und die Konstruktion so lange ändert, bis eine weitere Verbesserung ausgeschlossen erscheint.

Die Form des Querschnittes des Kernes ist von wesentlichem Einfluß auf die Länge der Windungen und mithin auf den Widerstand der Spulen. Eine rechteckige Form ist beispielsweise nicht so günstig als die quadratische, weil zum Einschließen gleicher Flächen beim Rechteck mehr Draht erforderlich ist als beim Quadrat. Ebenso ist im allgemeinen ein kreisförmiger Querschnitt vorteilhafter als ein quadratischer. Es kann aber der Fall eintreten, daß man aus konstruktiven Rücksichten verhindert ist, den Durchmesser des Kreises größer zu machen, als die Seite des Quadrates. Sind die linearen Dimensionen gleich, so enthält der quadratische Kern $\frac{4}{\pi}$ mal so viel Eisen als der kreisförmige und ist dann günstiger, wie sich leicht durch folgende Überlegung ergibt. Es sei r der Radius des Kreises (also $2r$ die Seite des Quadrates), δ die Dicke der auf dem Kern angebrachten Isolirschiicht und d die Dicke der Wickelung. Bei gleicher Induktion verhalten sich die EM.-Kräfte wie $\pi r^2 : 4r^2$. Die mittlere Länge einer Windung ist beim Kern von kreisförmigem Querschnitt $\pi (2[r + \delta] + d)$ und beim Kern von quadratischem Querschnitt $8(r + \delta) + \pi d$. Die in der Einheit der Drahtlänge erzeugte EMK ist also in diesen Fällen proportional zu $\pi r^2 : \pi (2[r + \delta] + d)$ und $4r^2 : (8[r + \delta] + \pi d)$ und das Verhältniß dieser Werte ist

$$\frac{2(r + \delta) + d}{2(r + \delta) + \frac{\pi}{4}d} > 1;$$

d. h. die pro Meter Draht induzierte EMK ist beim quadratischen Kerne größer als beim kreisförmigen und zwar wird der Unterschied um so größer, je dicker die Wickelung ist. Die

Erklärung dieses scheinbaren Widerspruches liegt einfach darin, daß der quadratische Kern mehr Eisen enthält und der so gebaute Transformator eine grössere Leistung gibt. Nun ist die Ausnützung des Materiales bei dem grösseren Apparat immer besser als bei dem kleineren.

Die Eisenkörper von Transformatoren müssen zur Vermeidung der Verluste durch Wirbelströme, wie schon erwähnt, aus Blechen oder Drähten aufgebaut werden. Bei Verwendung von Drähten, welche nicht besonders isoliert zu sein brauchen, werden 78 bis 80% des Raumes wirklich von Eisen ausgefüllt. Bei Blechen ist eine Isolation der einzelnen Bleche gegeneinander notwendig und diese kann aus einem Anstrich von Schellack, einer Oxydschicht oder eingelegten Papierblättern bestehen. Die letztgenannte Methode der Isolation ist am zuverlässigsten. Es werden dabei 12 bis 15% des Raumes verloren, so daß im Mittel $87\frac{1}{2}\%$ des Raumes wirklich von Eisen ausgefüllt werden. Bei Blechen wird also der Innenraum der Spulen besser ausgenützt als bei Drähten und werden neuerer Zeit aus diesem Grunde, sowie wegen der leichteren mechanischen Herstellung meistens Bleche für die Eisenkörper von Transformatoren verwendet.

Kern- und Manteltransformatoren. Wie schon eingangs erläutert wurde, beruht die Wirkung des Transformators auf einer Verkettung zweier von einander isolierten Stromkreise durch einen magnetischen Kraftlinienfluß. Diese Verkettung läßt sich sehr vielfach gestalten. Eine der einfachsten Formen ist in Fig. 6 dargestellt. Der Eisenkörper ist als rechteckiger Rahmen ausgebildet und die zwei längeren Seiten desselben bilden die Kerne für die Spulen. Man nennt diese Anordnung einen Kerntransformator; dieselbe ist dadurch charakterisiert, daß der größte Teil des Eisens innerhalb der Spulen liegt, bzw. die Oberfläche der Spulen überall dem abkühlenden Einfluß der Luft ausgesetzt ist.

Nun können wir uns die gegenseitige Lage von Eisen und Kupfer auch vertauscht denken. Wir können annehmen, daß der rechteckige Rahmen in Fig. 6 durch den Kupferdraht der beiden in diesem Falle aufeinander gelegten Spulen gebildet wird und daß wir jede der beiden längeren Seiten des Rechteckes durch Aufschieben von Eisenscheiben gewissermaßen mit einem Mantel von Eisen umhüllen. Ein so konstruierter Transformator wird

Manteltransformator genannt und dadurch charakterisiert, daß die Spulen zum Teil im Eisen eingebettet sind.

Bei der Kerntype hat man ein kleines Eisengewicht und eine kleine mittlere Windungslänge in den Spulen. Dagegen ist die Anzahl Windungen (wegen des Kernquerschnitts) verhältnismäßig groß und das Kupfergewicht trotz der kleinen mittleren Windungslänge beträchtlich. Die Länge des Pfades der Kraftlinien ist groß und dadurch steigen die zur Magnetisierung nötigen Ampèrewindungen. Andererseits ist die freie Lagerung und Zugänglichkeit von Spulen ein Vorteil.

Bei der Manteltype hat man einen kurzen magnetischen Kreislauf und erreicht deshalb die Magnetisierung mit wenigen Ampèrewindungen; die Spulen enthalten weniger Windungen und bedürfen trotz der größeren Windungslänge im allgemeinen weniger Draht als bei der Kerntype. Andererseits wird der Eisenkörper bedeutend schwerer, die Abkühlung der eingebetteten Spulen ist nicht leicht zu bewerkstelligen und die Spulen sind nur teilweise zugänglich.

Um uns zunächst ein ungefähres Bild über den Einfluß verschiedener Anordnungen zu machen, wollen wir an einem Beispiel diese Frage behandeln. Zu diesem Zwecke nehmen wir an, daß die verschiedenen Typen alle für gleiche Leistung berechnet seien. Es muß also das Produkt aus Strom und Spannung konstant sein. Der Einfachheit halber wollen wir annehmen, daß sowohl die Stromdichte in den Drähten, als auch der Strom selbst konstant bleiben sollen. Dann müssen wir alle Transformatoren mit demselben Drahte bewickeln und die Anzahl Windungen ist dem Wickelungsraum direkt proportional. Je größer der Wickelungsraum, desto größer kann die Anzahl Windungen in jeder Spule genommen werden und desto kleiner wird die gesamte Feldstärke N . Nehmen wir ferner an, daß die Induktion in allen Fällen die gleiche ist ($\mathfrak{B}$ konstant), so ändert sich der Kernquerschnitt im umgekehrten Verhältnis mit der Windungszahl, d. h. mit dem Wickelungsraum. Zur Beurteilung dient das Eisengewicht und die Drahtlänge.

Der Transformator a (Fig. 12) hat 400 qcm Kernquerschnitt (einschließlich des für die Isolation der Bleche nötigen Raumes) und 60 qcm Wickelungsraum. Das Eisengewicht ist 200 kg und die mittlere Länge einer Windung ist 119 cm. Bei 100 Windungen

in der Primärspule werden wir also für diese Spule 119 m Draht brauchen. Jetzt wollen wir den Eisenquerschnitt auf den vierten Teil verkleinern, dadurch, daß wir den Eisenkörper nicht 40 cm, sondern nur 10 cm lang machen. Dann müssen wir die Windungszahl viermal so groß machen, um dieselbe Spannung zu haben.

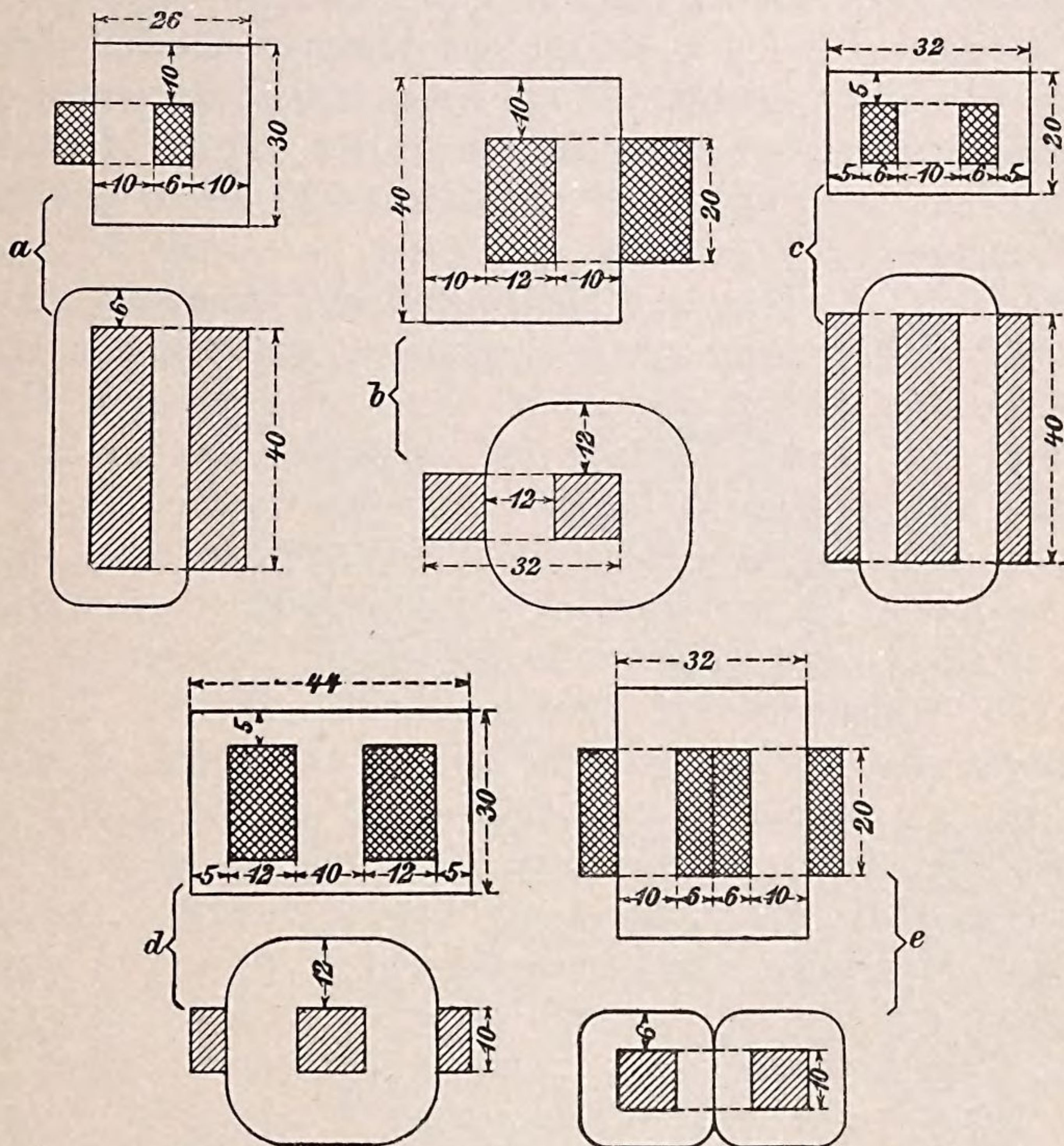


Fig. 12.

Der Wickelungsraum muß also $4 \times 60 = 240$ qcm Querschnitt erhalten. Wir kommen so zur Type b. Die mittlere Windungslänge ist jetzt nur 78 cm; da wir aber 400 Windungen brauchen, so ist die Drahtlänge jetzt größer geworden. Sie beträgt 312 m, also nahezu dreimal so viel wie früher. Dafür ist das Eisengewicht auf 73 kg, also nahezu auf ein Drittel vermindert worden. Bei gutem und billigem Eisen aber teurerem Kupfer ist demnach Type a vorzuziehen. Bei schlechtem und teurerem Eisen, aber billigem Kupfer ist Type b vorzuziehen. Beide Konstruktionen

lassen sich jedoch noch wesentlich verbessern. Wir können z. B. die Konstruktion *a* so abändern, daß wir beide Seiten der Spule mit Eisen umkleiden, also einen richtigen Manteltransformator daraus machen. Wir erhalten so die Type *c*. Der magnetische Kraftlinienfluß teilt sich dann zu beiden Seiten und der Mantel braucht nur den halben Querschnitt des Kernes zu haben. Die Drahtlänge ist wie bei *a* 119 m, das Eisengewicht ist aber auf 112 kg vermindert worden. Die Type *c*, welche bei einem nicht übermäßig großen Eisengewicht nur wenig Kupfer braucht, ist die besonders in Amerika und England beliebte Form des Manteltransformators.

Wenn wir die Type *b* in ähnlicher Weise verändern, gelangen wir zur Type *d*, welche streng genommen auch zu den Manteltransformatoren gehört, aber nicht den Vorteil geringen Kupfergewichtes hat. Die Drahtlänge ist wie früher 312 m; dafür ist aber das Eisengewicht auf 59 kg vermindert worden. Diese Konstruktion ist nur dann gerechtfertigt, wenn man mit dem Kupfer nicht zu sparen braucht und Eisen von besonders guter Qualität nicht erhalten kann. Sie wurde deshalb in früherer Zeit, d. h. bevor die Walzwerke auf Erzeugung guten Bleches für Transformatoren eingerichtet waren, in Europa verwendet. Heutzutage ist Blech von vorzüglicher Qualität leicht erhältlich und es ist deshalb nicht notwendig, mit dem Eisen sehr zu sparen. Es ist daher besser, die Änderung in der Type *b* derart vorzunehmen, daß man an Kupfer spart, was erreicht wird, indem man die Wickelung auf die zwei längeren Schenkel verteilt. Man gelangt so zur Type *e*, welche einen richtigen Kerntransformator bildet (vergl. Fig. 6). Die mittlere Länge einer Windung ist wegen der Verminderung in der Dicke der Wickelung erheblich kleiner als bei *b*. Die Drahtlänge ist 236 m und das Eisengewicht 73 kg. Diese Type ist in England und Deutschland vielfach im Gebrauch.

Der Übersicht halber stellen wir die obigen Ergebnisse tabellarisch zusammen:

Type	Eisengewicht kg	Drahtlänge m
<i>a</i>	210	119
<i>b</i>	73	312
<i>c</i>	112	119
<i>d</i>	59	312
<i>e</i>	73	236

In allen diesen Typen ist der magnetische Kreislauf vollständig geschlossen, d. h. die nützlichen Kraftlinien gehen nur durch Eisen. Es gibt außerdem noch eine Type von Transformatoren, bei welchen der Kraftlinienfluß nur zum Teil in Eisen, im übrigen aber durch die Luft verläuft. Es sind das die sog. Igeltransformatoren, die von Swinburne mit der Absicht eingeführt wurden, den Hysteresisverlust auf das thunlich geringste Maß herabzudrücken. Zu diesem Zwecke wickelt Swinburne die Spulen über einen aus Eisendrähten bestehenden Kern (Fig. 13a) und breitet die Enden der Eisendrähte halbkugelförmig aus, so daß der Transformator an beiden Enden dem Rücken eines Igels gleicht. Die Kraftlinien schließen sich dann durch die Luft, wie das die punktierten Linien andeuten. Der Hysteresisverlust ist also

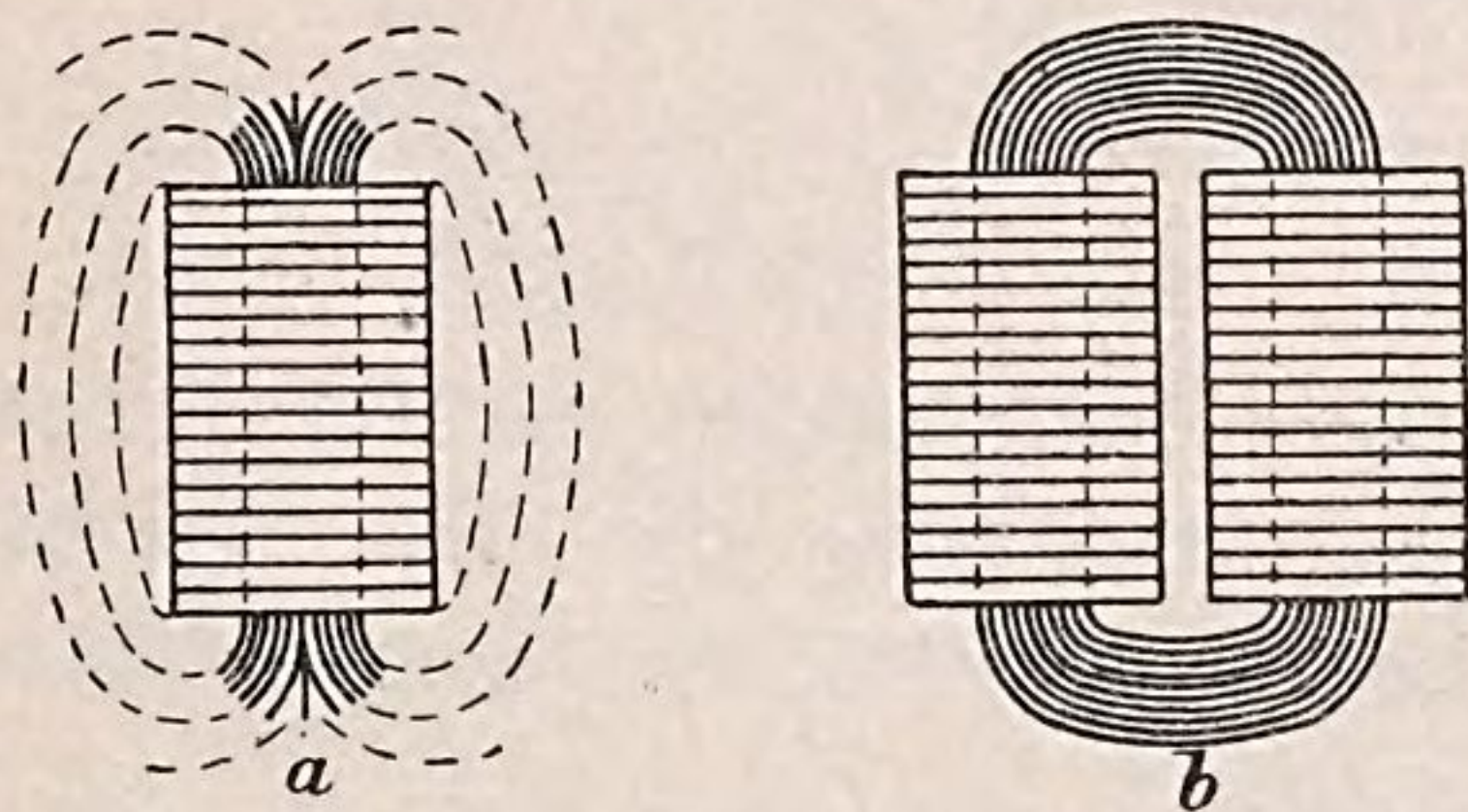


Fig. 13.

auf den eigentlichen Kern des Transformators beschränkt. Im Luftmantel findet kein Verlust statt. Diese Konstruktion hat sich in der Praxis nicht bewährt. Denkt man sich zwei solche Transformatoren nebeneinandergestellt (Fig. 13b) und die Drahtenden gegeneinander gebogen, so daß ein geschlossener Eisenpfad entsteht, so gelangt man zur gewöhnlichen Manteltype. Der Hysteresisverlust des so erhaltenen Transformators kann nur unbedeutend größer sein als jener von zwei einzelnen Igeltransformatoren (und zwar ist der Zuwachs an Verlust durch die kleine Verlängerung der Drähte, welche zur Verbindung der Kerne dienen, bedingt), so daß die Igeltype schon aus diesem Grunde keine bedeutende Ersparnis in den Hysteresisverlusten herbeiführen kann. Andererseits ist damit ein kleiner Zuwachs an diesen Verlusten verbunden, weil infolge der starken Streuung die Induktion in der Mitte des Kernes größer ist als an den Enden. Die EMK ist der mittleren Induktion proportional, während der Hysteresisverlust der

$\sqrt[1,6]{\mathfrak{B}}$ aus den Mittelwerten von $\mathfrak{B}^{1,6}$ proportional ist. Es erhellt

daraus sofort, daß bei ungleichmäßiger Induktion im Kern der Verlust größer sein muß, als bei gleichmäßiger. Außerdem hat der Igeltransformator noch den Nachteil, daß er bei Leerlauf einen außergewöhnlich hohen Strom verbraucht. Während die in Fig. 12 gezeichneten Typen bei Leerlauf einen Primärstrom brauchen, dessen Wert nur wenige Prozente von dem Primärstrom bei Vollbelastung ausmacht, braucht der Igeltransformator (Fig. 13 a) bis 60% des vollen Betriebsstromes, ist also schon aus diesem Grunde bei Stromverteilung von Centralen aus nicht zulässig. Für einen Zweck eignet sich jedoch der Igeltransformator recht gut, nämlich als Drosselspule; dafür ist seine Eigentümlichkeit, viel Strom bei mäßiger Spannung durchzulassen, sehr wertvoll. Für alle anderen Zwecke haben sich die Typen Fig. 12c und e in der Praxis am besten bewährt.

Drittes Kapitel.

Gebräuchliche Formen. — Konstruktion des Eisenkörpers. — Verhältnisse des Eisenkörpers. — Erwärmung der Transformatoren. — Versuchsergebnisse. — Einfluß der linearen Dimensionen.

Gebräuchliche Formen. Die in der Praxis gebräuchlichen Transformatoren lassen sich alle in zwei große Gruppen einreihen; nämlich Manteltransformatoren und Kerntransformatoren.

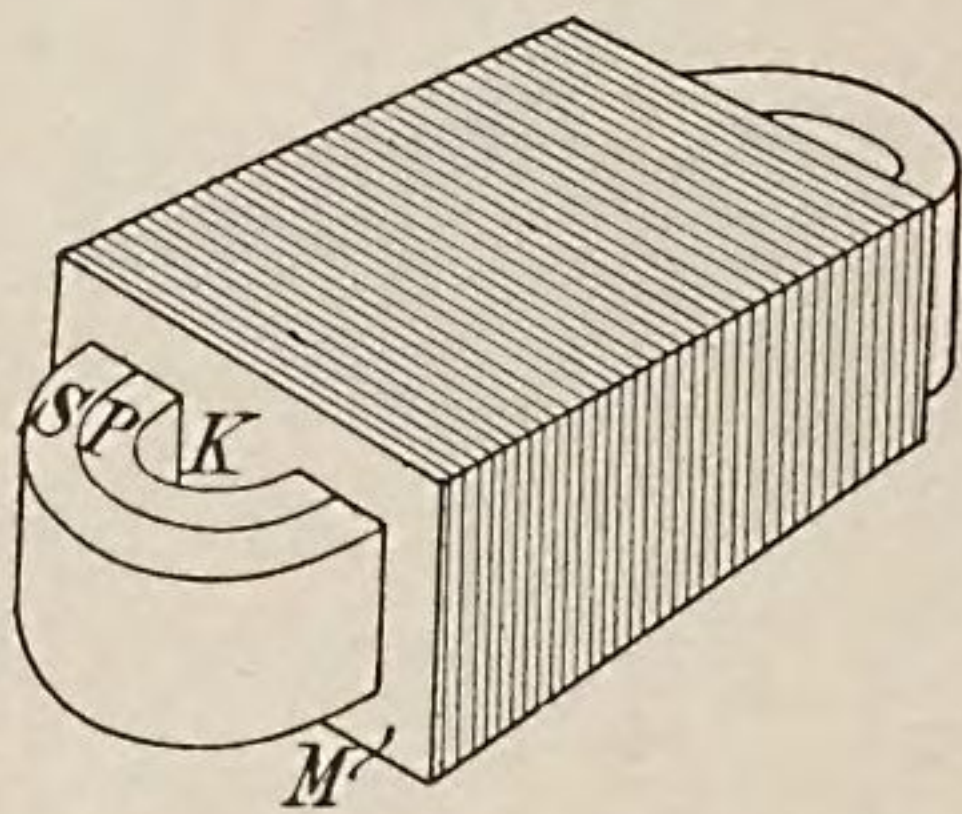


Fig. 14.

Die ersteren haben die in Fig. 14 skizzierte Gestalt. Die Spulen (P primär und S sekundär) sind länglich und entweder ineinander oder übereinander gelegt, und der Eisenkörper ist aus Blechen zusammengesetzt. Er ist so angeordnet, daß er den größten Teil der Spulen umgibt, so daß nur die zwei halbrunden Enden frei bleiben. Eine Abart dieser Konstruktion, bei welcher die Spulen kreisförmig sind und der Eisenkörper in Segmenten ringsherum angeordnet ist, wird auch ausgeführt, bietet aber keine besonderen

Vorteile. Die Bleche enthalten je zwei Fenster, so daß nach dem Aneinanderlegen der einzelnen Bleche zwei Kanäle zur Aufnahme der Spulen entstehen. Die Spulen werden zuerst hergestellt und die Bleche dann darüber bzw. dazwischen geschoben. Die verschiedenen Anordnungen, die man zu diesem Zwecke treffen kann, sind weiter unten angegeben. Die mittleren Blechstreifen K , die zwischen den Fenstern liegen, bilden den eigentlichen Kern der Spulen, und die äußeren Rahmen M bilden den sog. Mantel.

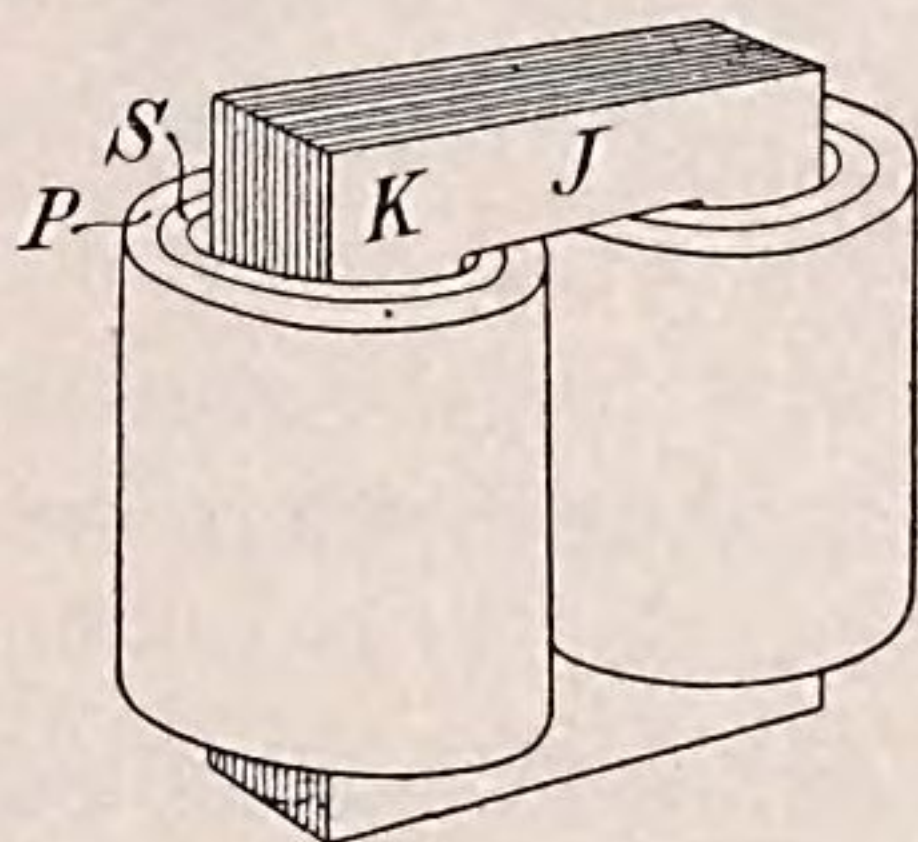


Fig. 15.

Der Eisenkörper der Kerntransformatoren besteht aus einem rechteckigen, auch aus Blechen zusammengesetzten Rahmen Fig. 15, dessen längere Seiten die Kerne K und dessen kürzere Seiten die Jochstücke J bilden. Der Querschnitt der Kerne ist meist quadratisch, kann aber auch rechteckig sein. In der Figur ist die Ebene der Bleche mit jenen des Rahmens parallel. Es gibt jedoch auch Konstruktionen, bei denen die Fläche der Bleche senkrecht zu einer durch die beiden Spulenachsen gehenden Ebene steht. Der Rahmen hat dann abgerundete Ecken und besteht aus in die richtige Form gebogenen Blechstreifen. Die Spulen (P primär und S sekundär) können ineinander oder in flachen Scheiben übereinander angeordnet sein.

Für Drehstrom wendet man ausschließlich die Kerntype an, die verschiedentlich ausgeführt werden kann. Zwei der gebräuchlichsten Anordnungen sind in den Fig. 16 und 17 dargestellt. Bei der ersteren sind die Jochstücke J durch Scheiben gebildet und die Kerne K in einem gegenseitigen Winkelabstand von 120° seitlich angesetzt. Die Enden der Kerne sind, wie die Figur zeigt, abgeschrägt und werden mittels entsprechend geformter Gußplatten seitlich gegen die Jochscheiben angedrückt. Die Spulen, welche der Deutlichkeit halber in der Skizze weggelassen sind, werden wie in Fig. 15 über die Kerne geschoben. Die in Fig. 17

dargestellte Konstruktion des Eisenkörpers ist eine Erweiterung von Fig. 15. Die drei Kerne K haben gemeinsame Jochstücke J ,

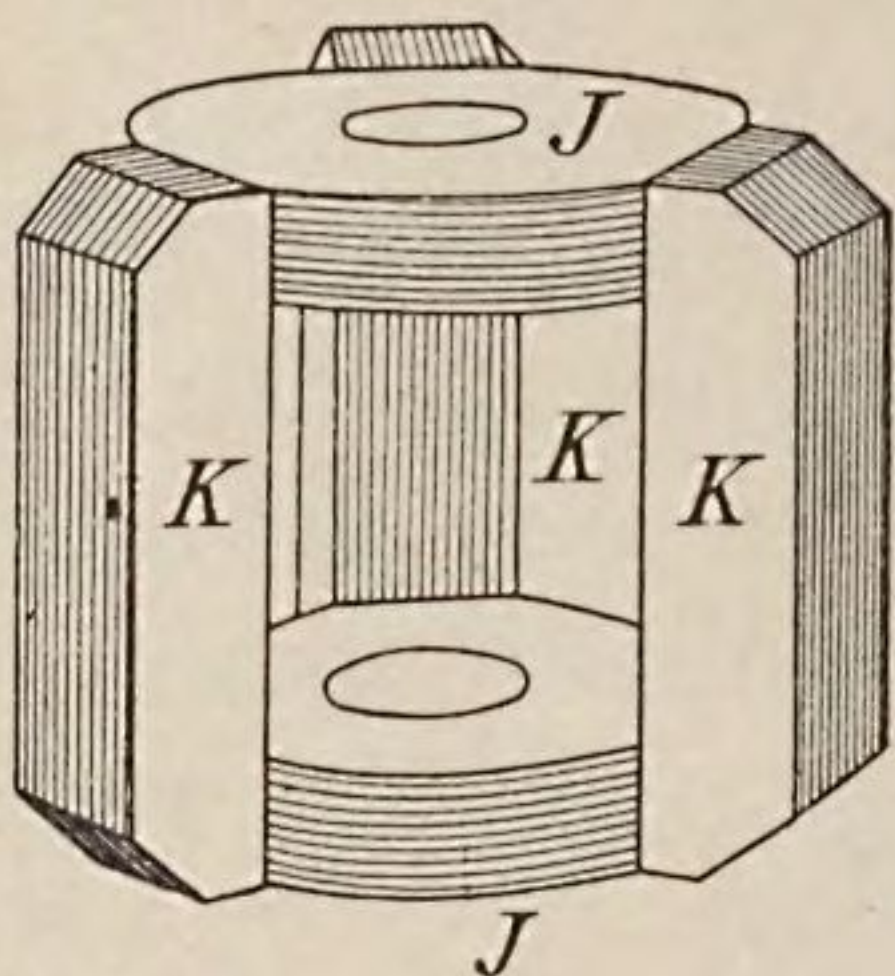


Fig. 16.

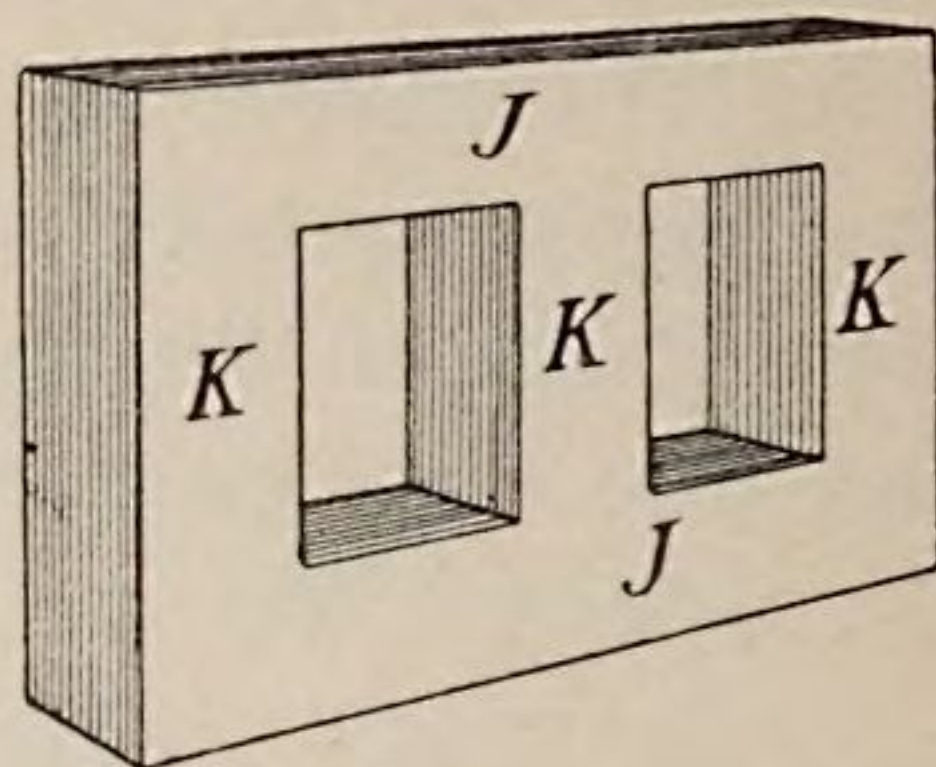


Fig. 17.

und jeder Kern wird von den beiden zu einer Phase gehörigen Spulen umgeben.

Konstruktion des Eisenkörpers. In den Fig. 14, 15 und 17 sind die Bleche, aus welchen der Eisenkörper zusammengesetzt ist, als vollständig geschlossene Flächen gezeichnet, d. h. es ist angenommen, daß der Kern mit Joch oder Mantel aus einem Stück gestanzt ist. Eine solche Konstruktion ist zwar möglich und hätte auch den Vorteil, daß der Pfad für die Kraftlinien keine Unterbrechung durch Stoßfugen hat; es wäre damit jedoch der Nachteil verbunden, daß man die Spulen zwischen Kern und Joch oder Kern und Mantel hindurch wickeln müßte. Die Wickelung in dieser Art auszuführen, ist sehr schwierig, weil die ganze Drahtlänge bei jeder Windung durch den ohnehin beschränkten Wickelungsraum gezogen werden muß. Man könnte also nicht auf der Drehbank wickeln und wo der Draht dick und infolgedessen steif ist, würde es auch nicht möglich sein, ihn von Hand fest zu wickeln. Zu dem käme noch der Übelstand, daß etwaige Isolationsfehler erst entdeckt werden könnten, wenn der Transformator fertig hergestellt ist, die Beseitigung von Fehlern also sehr viel unnötige Arbeit machen würde. Aus diesen Gründen empfiehlt es sich, die Konstruktion so einzurichten, daß die Spulen unabhängig vom Kern auf der Drehbank gewickelt werden können, und zwar womöglich jede einzeln. Dabei kann jede Drahtstärke bequem gewickelt und gut isoliert werden, und die fertige Spule kann auf ihre Isolation geprüft werden, bevor sie zum Aufbau des Transformators verwendet wird. Der Kern wird dann in die geprüften Spulen eingebaut. Um diesen Einbau jedoch zu

möglichen, ist es notwendig, die Kontinuität des magnetischen Pfades in jedem einzelnen Bleche zu unterbrechen, und es handelt sich darum, diese Unterbrechungen so einzurichten, daß sie auf die Gesamtheit der zusammengestellten Bleche keinen oder einen möglichst geringen Einfluß haben. Dieser Zweck läßt sich dadurch erreichen, daß man die Fugen gegen einander versetzt, so daß zu jeder Seite einer Fuge ununterbrochene Bleche zu liegen kommen. Dabei können die Kraftlinien, anstatt die Fuge zu überspringen, zu beiden Seiten derselben in die benachbarten Bleche übertreten, und da die Durchgangsfläche im Vergleich zur Stossfläche der Fuge selbst enorm groß ist, kann der magnetische Widerstand dieses Überganges als verschwindend klein vernachlässigt werden. Ein so zusammengesetzter Eisenkörper bietet also wirklich einen kontinuierlichen Pfad für die Kraftlinien.

Einige dieser Konstruktionen mögen hier beispielsweise Erwähnung finden. Im Westinghouse-Transformator sind die Bleche aus einem Stück gestanzt, aber zu beiden Seiten des Mittelsteiges

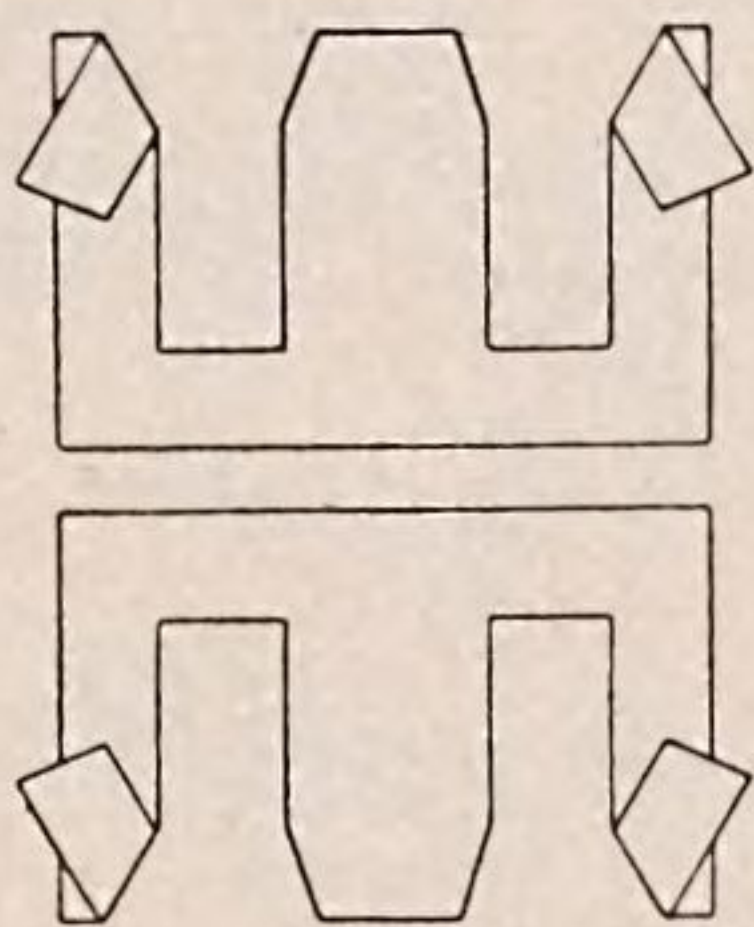


Fig. 18.

(Fig. 18) schräg aufgeschlitzt. Nachdem die Spulen hergestellt und entsprechend isoliert sind, wird der Eisenkörper in dieselben eingebaut, indem man die Bleche einzeln anbringt. Zu diesem Zwecke wird das Mittelstück jedes Bleches nach Umbiegung der beiden Lappen in die Spule eingeschoben. Die Lappen werden dann zurückgebogen, und das zweite unterhalb gezeichnete Blech wird in der gleichen Weise von der anderen Seite eingebracht. Dadurch werden die Fugen eines Bleches durch den kontinuierlichen Teil des nächsten Bleches abgedeckt.

Im Transformator von Ferranti (Fig. 19) besteht der Kern in einem Bündel von Blechstreifen, welches zunächst in die Spulen eingesteckt wird. Die Streifen werden dann einer nach dem andern

an beiden Enden der Spulen zurückgebogen, um den Mantel zu bilden. Dabei ist ihre Länge so bemessen, daß an der Berüh-

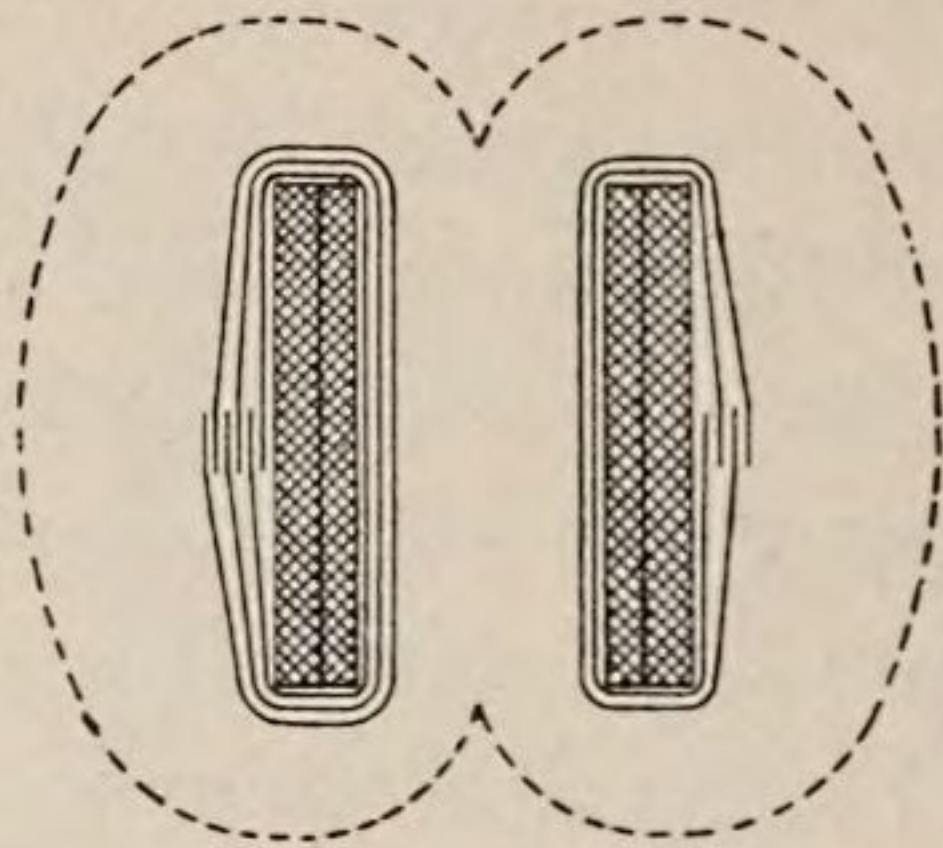


Fig. 19.

rungsstelle zwischen den Enden jedes Streifens noch eine kleine Überlappung bleibt, wie es in der Zeichnung angedeutet ist.

In dem vom Verfasser konstruierten Transformator (Fig. 15) bestehen sowohl Kerne als auch Joche aus Bündeln von geraden Blechen, die jedoch gegeneinander so versetzt sind, daß an den vier Ecken des Eisenkörpers eine Verzapfung entsteht, wie das

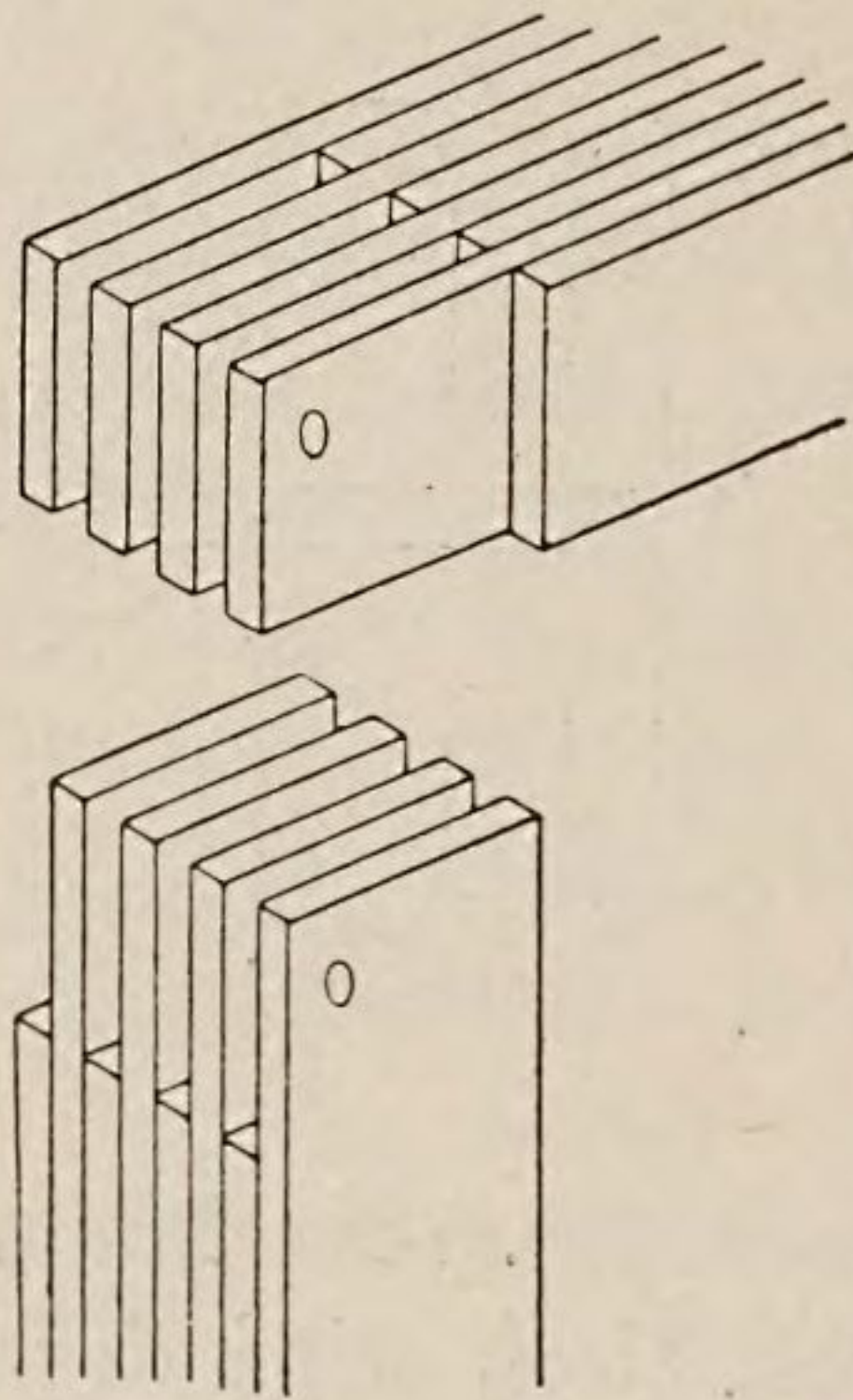


Fig. 20.

die Abbildung (Fig. 20) veranschaulicht. Um die Konstruktion klar zu machen, ist die Dicke der Bleche übertrieben groß gezeichnet. Die Bleche werden durch isolierte Bolzen zusammengehalten. Da alle verwendeten Blechstücke rechteckige Form haben, geht beim Ausschneiden derselben aus den Blechtafeln kein Material verloren.

In der Crompton'schen Anordnung (Fig. 21) bestehen die Bleche aus $\perp$ -förmigen Stücken, welche abwechselnd von der

einen und der anderen Seite in die Spulen eingeschoben werden, so zwar, daß die Fugen einer Lage durch die vollen Bleche der

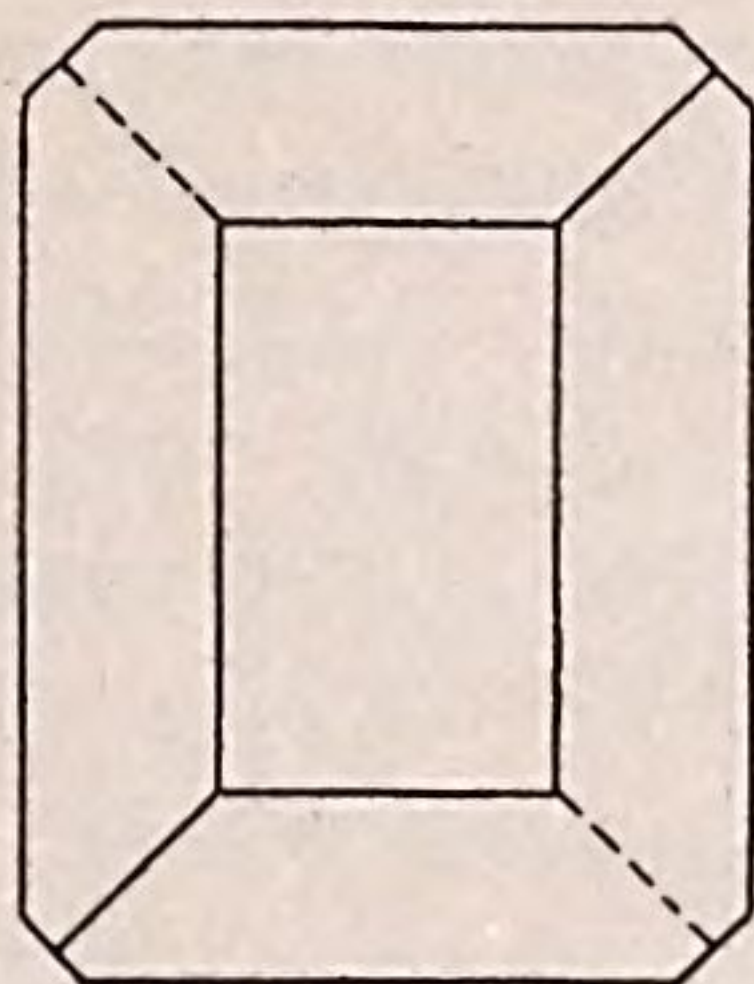


Fig. 21.

nächsten Lage abgedeckt werden. Beim Ausstanzen aus den Tafeln findet wegen der eigentümlichen Form der Stücke ein gewisser Materialverlust statt.

Beim Stanzen der Bleche für den Westinghouse-Transformator (Fig. 18) geht ebenfalls das in den zwei Fenstern ausgestanzte Material verloren. Um diesen Verlust zu vermeiden, hat Mordey diese Konstruktion so abgeändert, daß der mittlere Steg

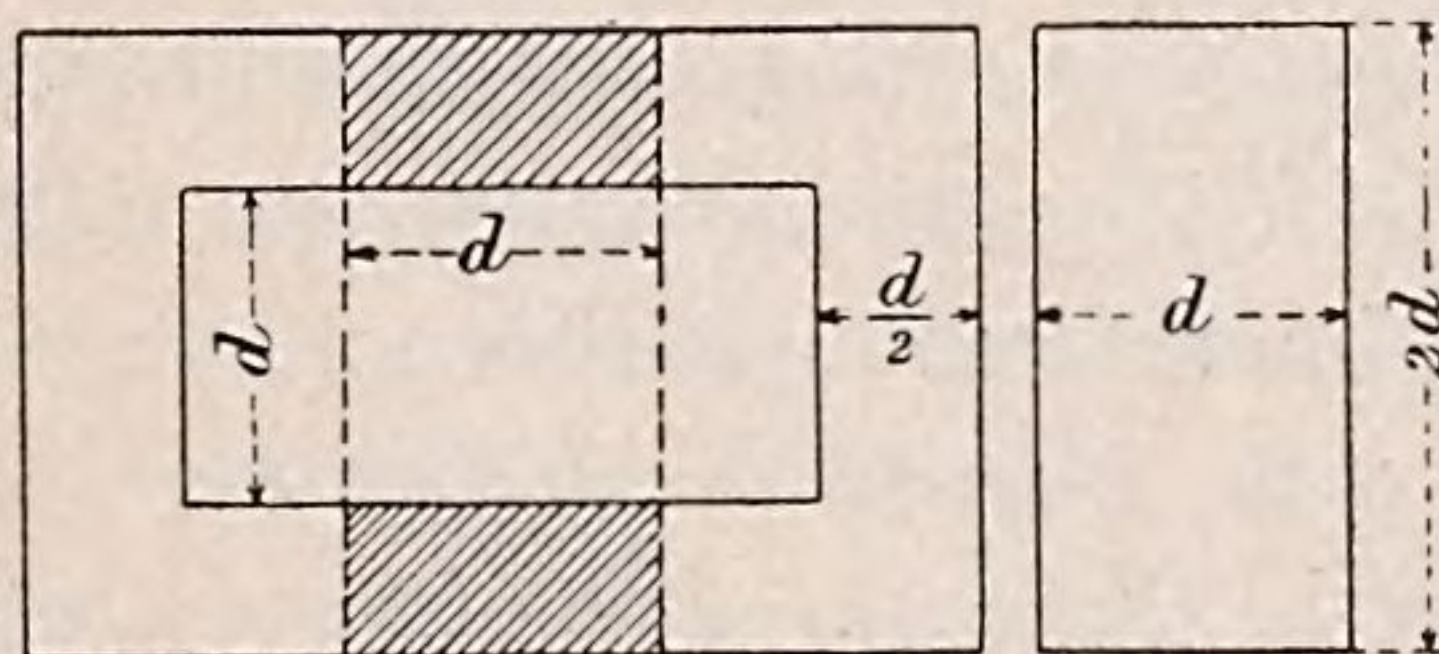


Fig. 22.

durch den herausgestanzten Teil gebildet wird (Fig. 22). Man bekommt also aus jedem Stanz zwei Stücke: den rechteckigen Mantel und den quer darüber zu legenden Steg oder Kern. Die Mantelbleche werden über und die Kernbleche durch die Spulen geschoben. Bei dieser Konstruktion ist die Größe des Wicklungsraumes durch die Kerndicke d gegeben und kann nicht beliebig genommen werden, wie in Fig. 18; denn, wie sich aus der Zeich-

nung ergibt, ist die Höhe jedes Fensters d und seine Breite $\frac{d}{2}$.

Daraus folgt auch, daß die äußeren Dimensionen des Mantels $3d$ und $2d$ sind. Eine Berührung zwischen Kern und Mantel findet nur in den schraffierten Teilen statt, in den übrigen Teilen ist zwischen je zwei Blechen eine gleich dicke Luftschicht. Es

wird also nur die Hälfte des inneren Raumes der Spulen wirklich von Eisen ausgefüllt. Mit anderen Worten, die Länge jeder Windung muß größer sein als in Fig. 18, wo der ganze Raum von Eisen ausgefüllt ist. Um diesem Übelstande abzuhelpen, stanzt

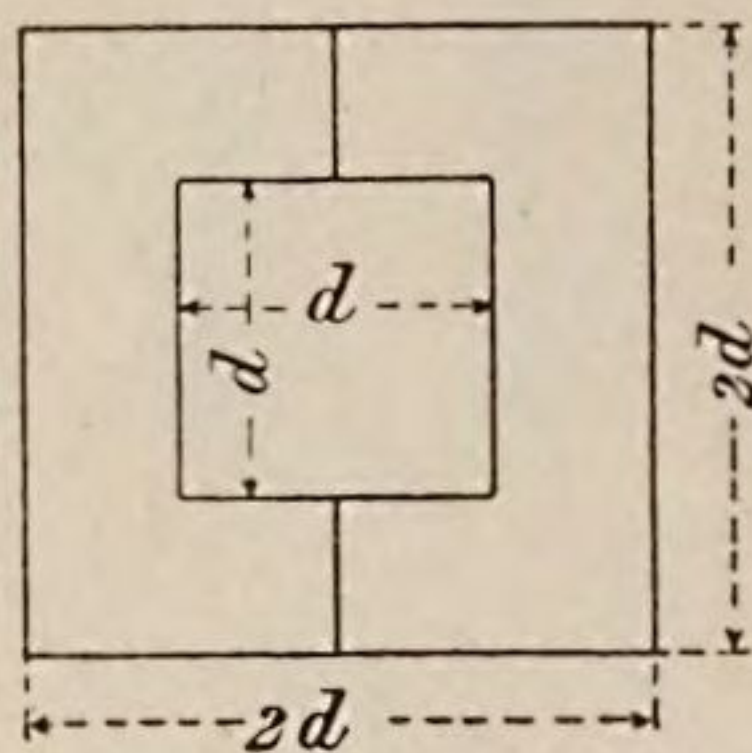


Fig. 23.

Mordey noch die in Fig. 23 dargestellten Stücke und zwar wieder ohne jeglichen Materialverlust. Das innere Quadrat wird zur Ausfüllung des Kernes benutzt, und die beiden äußeren Stücke zur Ausfüllung des Mantels. Es kommen also fünf Stücke für je zwei Blechlagen zur Verwendung. Die Abhängigkeit des Windungsraumes von der Kerndicke ist eine notwendige Folge der Bedingung, daß die Bleche aus den Tafeln ohne jeden Materialverlust hergestellt werden sollen. Obwohl die dadurch erhaltenen Verhältnisse zwischen Kerndicke und der Höhe und Breite des Wicklungsraumes im allgemeinen brauchbar sind, so kann doch eine Abweichung von diesen Verhältnissen aus Konstruktionsrücksichten notwendig werden. In solchen Fällen muß man eine gewisse Materialverschwendung beim Ausstanzen der Bleche mit in den Kauf nehmen. Dieselbe ist jedoch sehr unbedeutend, wenn man die von Mordey angegebene Herstellungsweise der zur Ausfüllung bestimmten Teile beibehält.

In den bisher erläuterten Konstruktionen ist das Prinzip einer gegenseitigen Überlappung oder Verzapfung der einzelnen Bleche an den Verbindungsstellen eingehalten, wodurch der magnetische Widerstand an den Fugen verschwindend klein wird. Man kann jedoch auch von diesem Prinzip abgehen und die Verbindung zwischen Kern und Joch oder Kern und Mantel durch möglichst glatte Stofsfugen bewerkstelligen. Bei Fig. 16 ist dieses durch die Konstruktion selbst sogar geboten, bei Fig. 15 und 17 sind Stofsfugen zwar vermeidlich, werden aber doch manchmal angewendet, weil dadurch der Aufbau des Apparates bequemer wird. Man kann nämlich alle Teile des Eisenkörpers fertig herstellen, bevor

die Spulen aufgesetzt werden, und kann auch bei Reparaturen eine Spule herausnehmen und durch eine andere ersetzen, ohne die Bleche einzeln auseinandernehmen und wieder einzeln einbauen zu müssen. Diese Anordnung hat jedoch den Nachteil, daß an den Fugen ein merklicher magnetischer Widerstand auftritt, welcher zur Folge hat, daß der Transformator zu seiner eigenen Magnetisierung mehr Strom gebraucht als bei Anwendung von überlappenden oder verzapften Verbindungen. Der Einfluß der Stoßfugen auf den Magnetisierungsstrom ist im nächsten Kapitel behandelt. Augenblicklich möge es genügen, darauf hinzuweisen, daß der magnetische Widerstand von der Entfernung der Eisenteile abhängt, daß es aber nicht angängig ist, diese Entfernung auf Null zu reduzieren, weil dadurch an den Berührungsflächen Wirbelströme entstehen würden, welche Arbeitsverluste und Erhitzung hervorbringen würden. In dem Falle, wo die Ebenen der Bleche an der Stoßfuge aufeinander senkrecht stehen, wie in Fig. 16, ist es ohne weiteres klar, daß bei wirklicher Berührung zwischen den Blechkanten geschlossene Stromkreise entstehen, welche der direkten Einwirkung des durch die Fuge hin- und herwogenden Kraftlinienflusses ausgesetzt sind. Die dadurch hervorgerufenen Ströme sind also sehr groß und bedingen nicht nur einen Arbeitsverlust, sondern schwächen geradezu das Feld, d. h. vermehren die magnetische Streuung. Um diesen Übelständen zu begegnen, muß man die Berührung der sich kreuzenden Blechkanten durch Einlage einer Isolierschicht vermeiden.

Selbst wenn die Blechkanten sich nicht kreuzen, sondern zu einander parallel verlaufen, ist die Einlage einer isolierenden

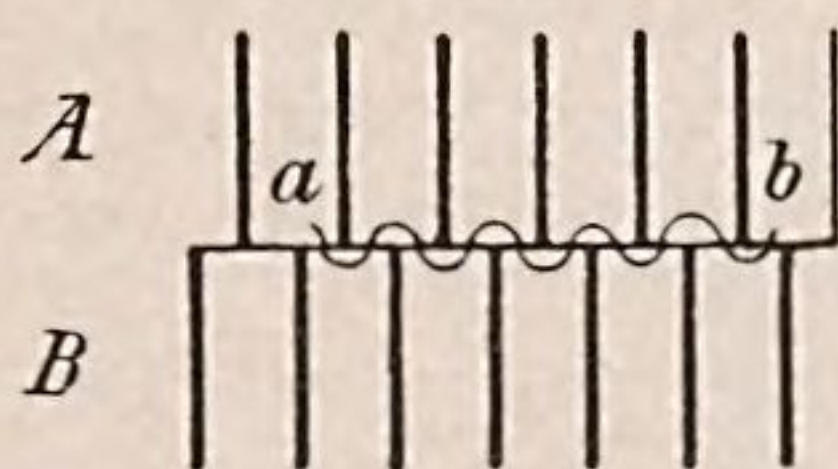


Fig. 24.

Schicht notwendig. In Fig. 24 ist eine Stoßfuge ohne isolierende Einlage dargestellt, wobei die Blechdicke übertrieben groß gezeichnet ist. Die Isolation zwischen den Blechen ist durch die starken Linien dargestellt. Obzwar die Dicke aller Bleche die gleiche ist (oder wenigstens sein soll), so kann man doch nicht erwarten, daß an der Stoßfuge die Bleche und Isolierschichten

genau aufeinander passen. Man wird vielmehr mit dem Umstande rechnen müssen, daß hie und da eine kleine seitliche Verschiebung zwischen den Blechen des Körpers *A* und jenen des Körpers *B* stattfindet. Wenn nun die Figur eine solche Stelle darstellt, so sieht man, daß zwischen den Blechen *a* und *b* metallische Verbindung herrscht, und daß zwischen diesen Blechen ein durch die Wellenlinie angedeuteter Wirbelstrom fließen muß. Um diesem Strom den Weg abzuschneiden, müssen wir eine Schicht von isolierendem Material (Papier oder Prefsspahn) in die Stossfuge

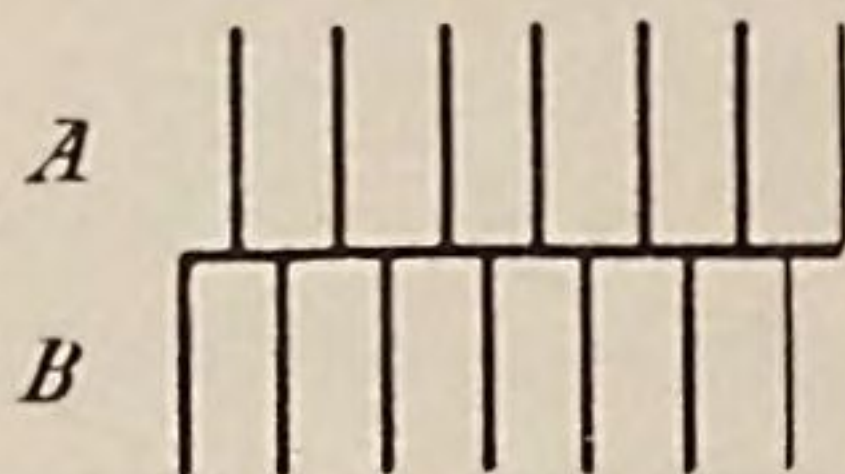


Fig. 25.

einlegen (Fig. 25). Abgesehen davon, daß es bei aus vielen Blechen zusammengesetzten Stücken mechanisch kaum möglich ist, die Stosflächen so genau zu bearbeiten, daß wirklich über deren ganze Ausdehnung Berührung stattfindet, muß selbst stellenweise Berührung durch Zwischenlegen von Papier oder Prefsspahn vermieden werden, und die Stosfugen müssen daher immer einen merklichen magnetischen Widerstand haben.

Verhältnisse des Eisenkörpers. Die Güte der Konstruktion hängt sehr wesentlich von dem Verhältnis zwischen den verschiedenen Dimensionen des Eisenkörpers ab. Wenn wir beispielsweise bei der Type Fig. 15 die Kerne sehr kurz machen, so müssen wir, um den nötigen Windungsraum zu erhalten, die Joche *J* lang machen. Gleichzeitig wird die mittlere Windungslänge und mithin das Kupfergewicht vergrößert. Wir erhalten somit eine ungünstige Konstruktion. Machen wir umgekehrt die Kerne sehr lang und dünn, so wird der magnetische Pfad lang, und der Transformator braucht viel Leerlaufstrom. Wir thun also besser, die Kerndicke zu vergrößern. Allerdings darf man auch in dieser Beziehung nicht zu weit gehen, weil man sonst zu viel Eisengewicht und zu viel Hysteresisverlust bekommt. Es lassen sich für die günstigsten Verhältnisse keine bestimmten Angaben geben; man muß dieselben vielmehr von Fall zu Fall durch versuchsweises Konstruieren bestimmen, wobei der angestrebte Wirkungsgrad, die mittlere und maximale Belastung, die Eisen- und

Kupferpreise etc. mit in Rechnung zu ziehen sind. Um jedoch einen Anhaltspunkt für den ersten Entwurf zu haben, kann man die in Fig. 26 angegebenen Verhältnisse annehmen. Es ist dabei vorausgesetzt, daß der Kern einen quadratischen Querschnitt hat,

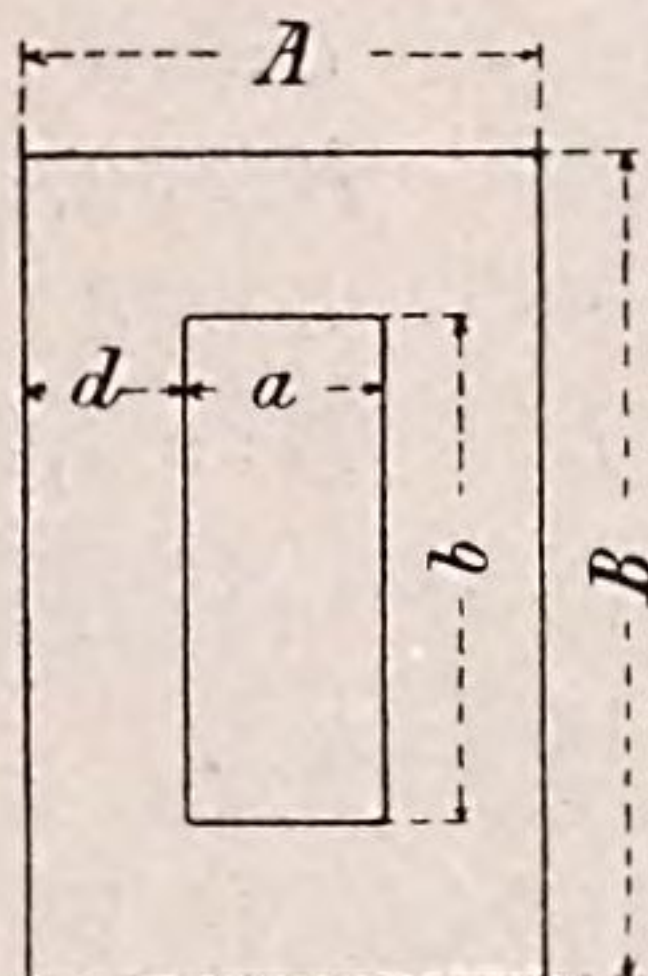


Fig. 26.

wobei, wenn die Verbindung von Joch und Kern durch Verzapfung geschieht, die Ecken des Quadrates noch abgeschrägt sein können. Dadurch wird die mittlere Windungslänge etwas vermindert. Wir beziehen zweckmässig alle Dimensionen auf die Kerndicke d in Millimetern. Dann sind die übrigen Abmessungen in Millimetern durch folgende Gleichungen gegeben:

$$a = 10 + 1,2 d$$

$$b = 100 + 2,6 d$$

$$A = 10 + 3,2 d$$

$$B = 100 + 4,6 d.$$

Bei Manteltransformatoren mit kurzen Kernen der Type Fig. 14, für welche die Bleche ohne jeden Materialverlust beim Stanzen hergestellt werden sollen, ist in Fig. 27

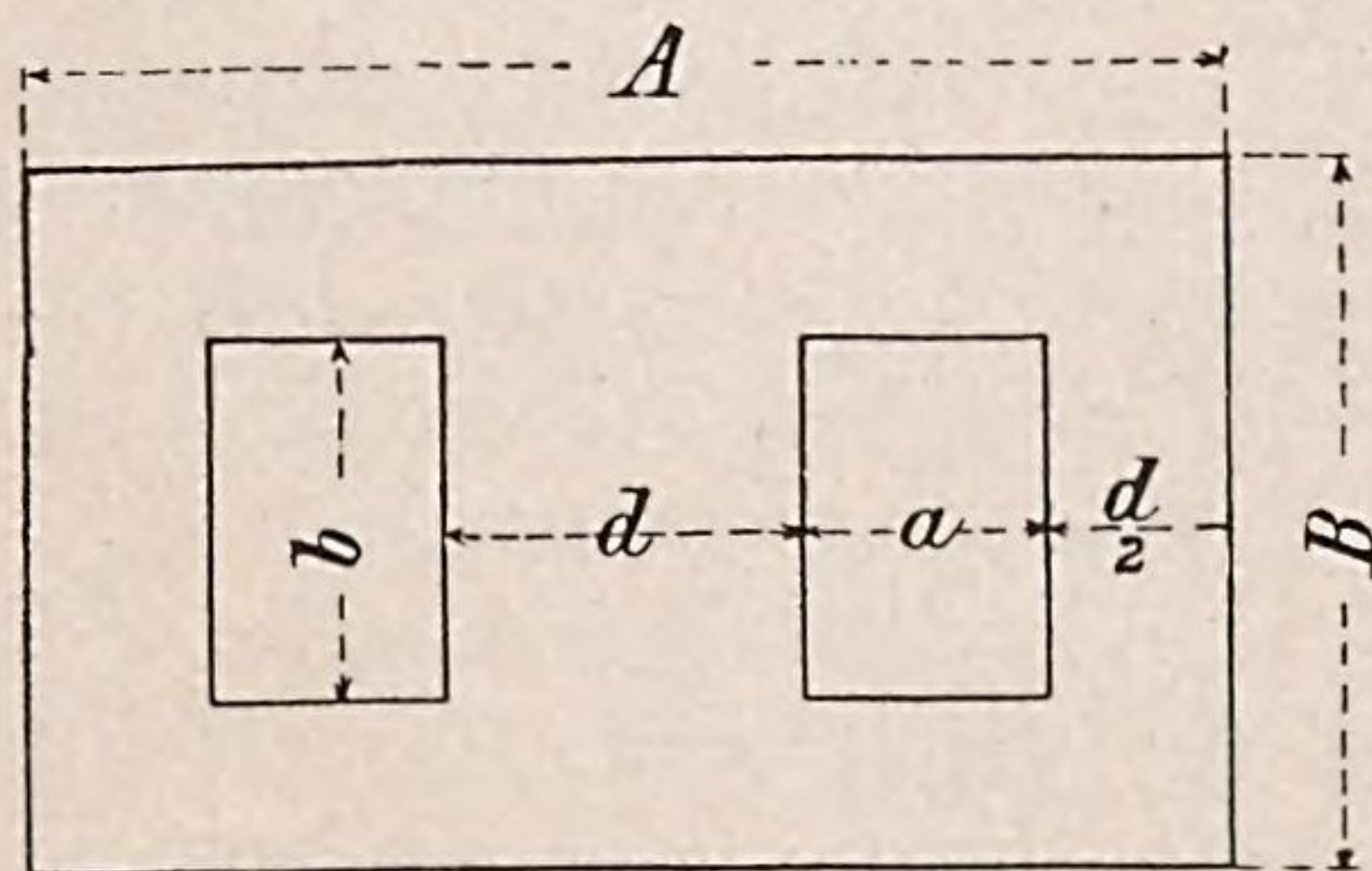


Fig. 27.

$$a = \frac{d}{2} \quad b = d$$

$$A = 3d \quad B = 2d.$$

Wenn jedoch etwas Materialverschwendung beim Stanzen zulässig ist, so kann man a nach Bedarf gröfser nehmen. Man kann dann auch mit ganz geringer Materialverschwendung folgende Dimensionen wählen:

$$\begin{array}{ll} a = 0,6d & b = d \\ A = 3,2d & B = 2,2d \text{ oder} \\ a = 0,7d & b = d \\ A = 3,4d & B = 2,4d. \end{array}$$

Die Länge des Eisenkörpers senkrecht zur Ebene der Bleche gemessen kann $2d$ bis $4d$ betragen.

Erwärmung der Transformatoren durch die Arbeitsverluste. Beim Betrieb eines Transformators wird ein gewisser Teil der gesamten von der Primärspule aufgenommenen Arbeitsleistung in Wärme umgesetzt, welche von der Oberfläche des Apparates ausgestrahlt oder anderweitig fortgeführt werden mufs. Damit nun Ausstrahlung oder Weiterleitung der Wärme eintreten kann, mufs die Temperatur des Transformators höher als die des umgebenden Mittels sein. Es tritt also notwendigerweise eine Temperaturerhöhung ein, welche um so gröfser sein wird, je kleiner die Oberfläche des Transformators im Vergleich mit der gesamten in Wärme umgesetzten Arbeitsleistung ist. Die Temperaturerhöhung ist somit eine Funktion von $\sigma = \frac{S}{P_v}$, wobei S die Oberfläche und P_v den im Transformator verloren gegangenen Arbeitseffekt bedeutet. Der Charakter dieser Funktion mufs durch Versuche mit ausgeführten Transformatoren bestimmt werden und hängt natürlich von der Type des untersuchten Transformators ab. Bei solchen Typen, in welchen die äussere Luft freien Zutritt zu den Spulen und Teilen des Kernes hat, ist die abkühlende Wirkung der Oberfläche gröfser, bei Transformatoren in Gehäusen kleiner. Es wird also die Temperaturerhöhung $T = f(\sigma)$ im ersten Falle gröfser und im zweiten kleiner sein. Wird ein Gehäuse verwendet, so ist die Funktion auch verschieden, je nachdem dasselbe nur mit Luft oder mit einer isolierenden Flüssigkeit, wie z. B. Öl, gefüllt ist; denn Öl überführt die Wärme an die Wände des Gehäuses besser als Luft.

Die Anwendung von Öl als Füllmaterial zwischen dem Transformator und seinem Gehäuse hat auch noch den Vorteil, dafs

die Isolation besser erhalten bleibt, besonders wenn der Transformator im Freien oder in einem feuchten Raume aufgestellt werden muß. Da die Belastung eines Transformators im regelmäßigen Betrieb zwischen weiten Grenzen schwankt, so ändert sich auch seine Temperatur und die Temperatur der im Gehäuse eingeschlossenen Luft. Es treten also Druckänderungen in der Luft auf, welche ein langsames Austreten der inneren und Wiedereinsaugen der äußeren, feuchten, Luft zur Folge haben. Dadurch wird aber Feuchtigkeit nach und nach in das Gehäuse gebracht, welche mit der Zeit die Isolation schädigen kann. Bei Anwendung von Öl als Füllmaterial wird dieser Übelstand behoben. Da jedoch das Öl einen ziemlich großen Ausdehnungskoeffizienten hat, darf man das Gehäuse nicht ganz mit Öl füllen, oder man muß durch Anbringung eines Standrohres dafür sorgen, daß bei Erwärmung der innere Druck der Flüssigkeit nicht so ansteigen kann, daß das Gehäuse gesprengt wird.

Die im Transformator erzeugte Wärme rührt von drei Ursachen her: Erstens von der Hysteresis, zweitens von der Stromwärme infolge des ohmischen Widerstandes der Spulen und drittens von der durch Wirbelströme in den metallischen Teilen des Apparates erzeugten Wärme. Der Verlust durch Hysteresis hängt nur von der Induktion und Periodenzahl, nicht aber von der Leistung des Transformators ab. Die dadurch erzeugte Wärme ist also bei konstanter Spannung und Periodenzahl auch konstant. Diese Wärme wird lediglich im Eisen erzeugt. Die Stromwärme wird lediglich in den Spulen erzeugt und ändert sich mit dem Quadrate der Leistung. Die durch Wirbelströme erzeugte Wärme kann sowohl im Eisen als auch in den Spulen und in anderen benachbarten Metallteilen auftreten, besonders wenn die geometrische Anordnung der Spulen derart ist, daß bedeutende magnetische Streuung stattfindet. Es ist jedoch immer möglich und für den praktischen Gebrauch auch in den meisten Fällen notwendig, den Transformator so zu konstruieren, daß erhebliche Streuung überhaupt nicht eintritt. Dann kann die Wirbelstromwärme, als nur unbedeutend, ganz vernachlässigt werden.

Wir haben also lediglich Hysteresis und Stromwärme zu betrachten. Der durch Hysteresis verbrauchte Effekt kann durch Einschaltung eines Wattmeters in den primären Stromkreis leicht bestimmt werden. Der Verlust durch Stromwärme kann aus den

Widerständen der Spulen und den Strömen bei Vollbelastung berechnet werden. Wir finden so den Gesamtverlust. Um nun die entsprechende Temperaturerhöhung zu finden, müssen wir den Transformator dauernd unter voller Belastung betreiben und seine Temperatur von Zeit zu Zeit messen. Dabei empfiehlt es sich, ein Weingeist- und nicht ein Quecksilberthermometer zu verwenden, weil, im Falle etwas Streuung vorhanden sein sollte, im Quecksilber selbst Wirbelströme auftreten könnten, welche zu einer zu hohen Temperaturangabe führen würden. Wenn man nun die Temperatur als Funktion der Zeit graphisch aufträgt, so

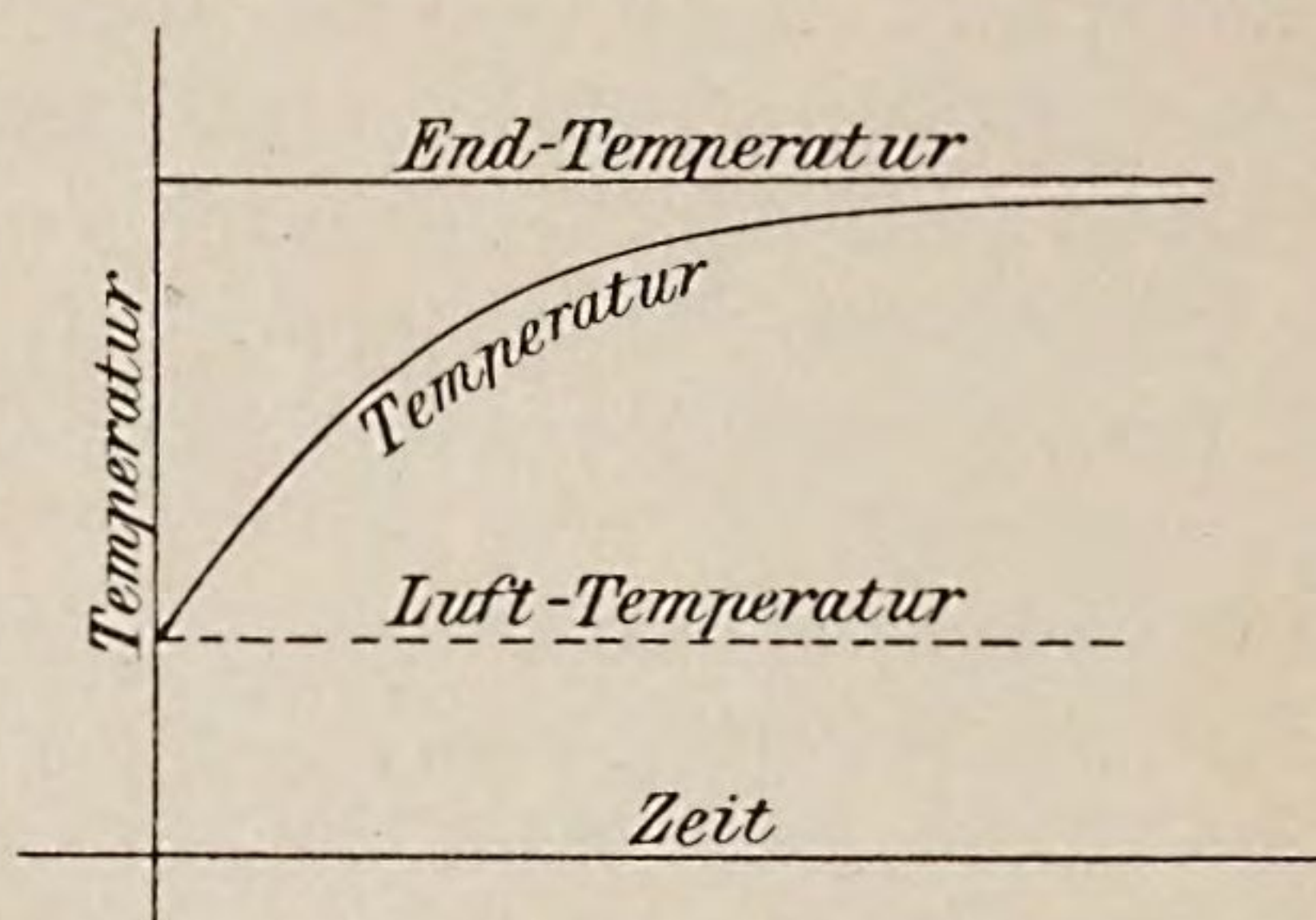


Fig. 28.

erhält man eine Kurve (Fig. 28), welche anfänglich rasch ansteigt und sich allmählich einer horizontalen Asymptote nähert. Die Ordinate dieser Asymptote ist die Temperatur bei Dauerbetrieb. Nun wird die endgültige Temperatur selbst bei kleinen Transformatoren erst nach mehreren Stunden und bei großen Transformatoren von hohem Wirkungsgrad sogar erst nach Tagen erreicht; ein derartig ausgeführter Versuch würde also wegen der Notwendigkeit, eine große Betriebskraft während einer langen Zeit zu verwenden, sehr kostspielig werden. Diesen Übelstand kann man dadurch umgehen, daß man den Transformator überhaupt nicht mit Vollbelastung, sondern bei Leerlauf betreibt und ihm elektrisch genau so viel Energie zuführt, als dem gesamten Verlust bei Vollbelastung entspricht. Wird diese Energie in Form eines Wechselstromes zugeführt, so wird die Erzeugung der Wärme auf das Eisen beschränkt, denn die geringe Wärme des Leerlaufstromes kommt gar nicht in Betracht. Diese Versuchsmethode stellt also nicht genau das vor, was dem wirklichen Betrieb unter Belastung entspricht, indem in letzterem Falle im Eisen sowohl als auch in den Spulen Wärme

frei wird. Wird nun andererseits ein Gleichstrom durch die Hochspannungsspule geschickt, so kann dessen Stärke auch so reguliert werden, daß der Energieverlust dem Gesamtverlust bei Vollbelastung entspricht, aber dann wird die Wärme nur in dieser Spule und nicht im Eisen frei. Es entspricht also diese Versuchsmethode auch nicht der Wirklichkeit. Eine Kombination beider Methoden gibt jedoch eine genügende Annäherung an die wirklichen Betriebsverhältnisse. Wir können dabei abwechselnd die primäre Spule durch Gleichstrom und das Eisen durch einen in die sekundäre Spule geleiteten Wechselstrom heizen. Es ist dabei am bequemsten, wenn man tagsüber den Wechselstrom und während der Nacht den Gleichstrom benutzt, weil letzterer von einer Akkumulatorenbatterie geliefert werden kann, welche keine Bedienung gebraucht.

Versuchsergebnisse. Ich habe nach dieser Methode ausgedehnte Versuche über die Erhitzung von Transformatoren an-

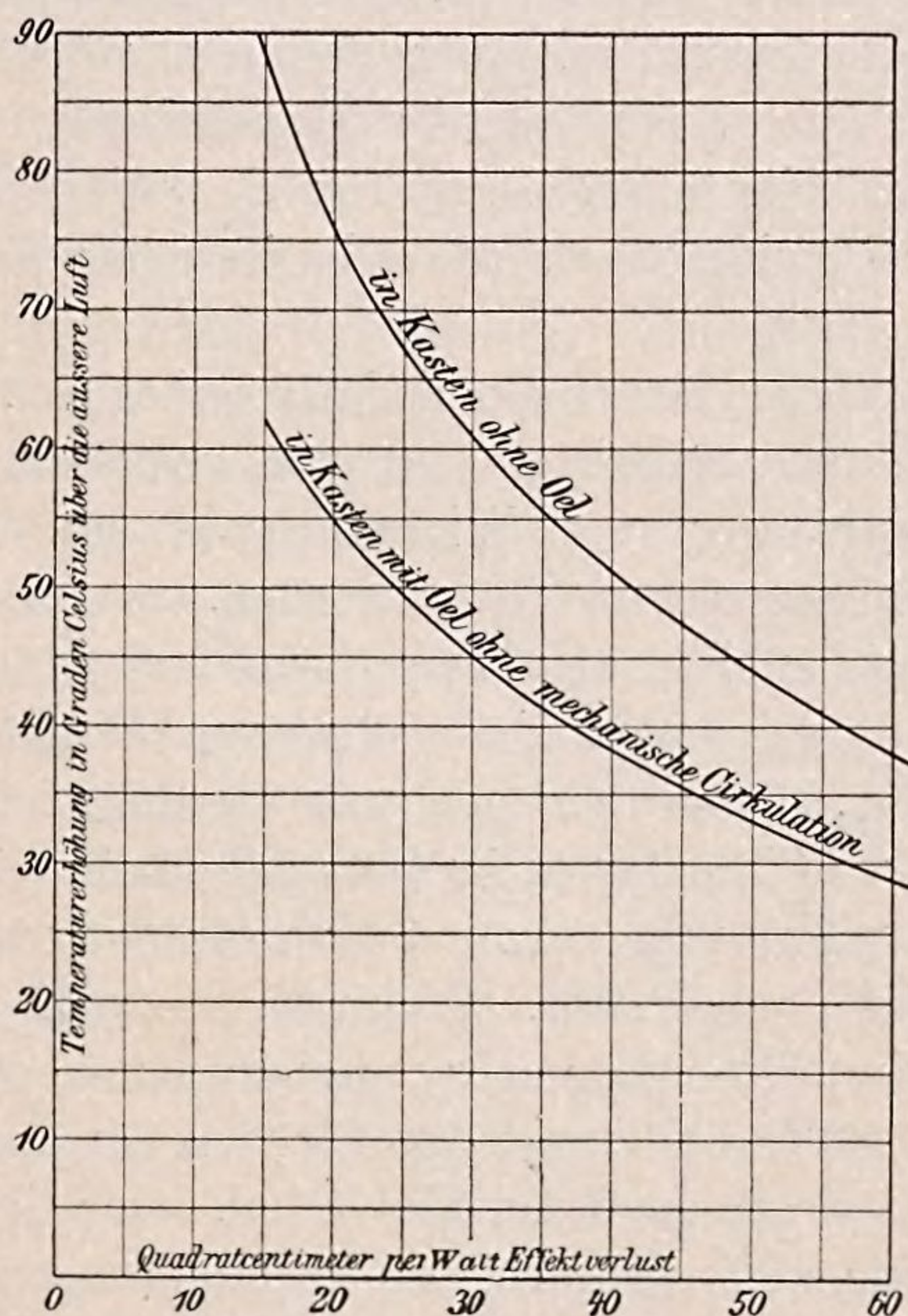


Fig. 29.

gestellt, und zwar bei verschiedenen Belastungen, um die Abhängigkeit zwischen der Temperaturerhöhung und Abkühlungs-

fläche per Watt Verlust festzustellen. Diese Versuche wurden sämtlich mit Transformatoren angestellt, welche in gusseiserne Gehäuse eingesetzt waren und zwar sowohl mit als auch ohne Öl als Füllmaterial. Die Resultate sind in den beiden Kurven Fig. 29 dargestellt. Die Gehäuse standen auf einem cementierten Boden in einem großen gedeckten Raume, so daß die Luft von allen Seiten Zutritt hatte und Wärme auch in den Boden abfließen konnte. Bei Aufstellung im Freien würde die Temperaturerhöhung etwas kleiner und bei Aufstellung in beengten Räumen würde sie etwas größer ausfallen, als die Kurven angeben. Bei Ölfüllung wurden keine mechanischen Mittel zur Zirkulation verwendet.

Bei Verwendung dieser Kurven zur Beurteilung von verschiedenen Konstruktionen darf man nicht vergessen, daß die angegebenen Werte für Dauerbetrieb bei Vollbelastung gelten. Nun sind die meisten Transformatoren, besonders jene für Beleuchtungszwecke, wohl dauernd im Betrieb, aber nicht immer voll belastet. Diesem Umstande kann Rechnung getragen werden, indem man den Verlust für die verschiedenen Tageszeiten durch Rechnung bestimmt und so einen Mittelwert für P_v findet, welcher, in die Formel $\sigma = S : P_v$ eingesetzt, die Abscisse zur Temperaturkurve darstellt.

Einfluss der linearen Dimensionen. Die meisten Maschinen und mechanischen Apparate gestalten sich in Bezug auf Materialausnutzung und Wirkungsgrad günstiger, wenn sie in größerem Maßstabe ausgeführt werden, und es steht deshalb zu erwarten, daß auch große Transformatoren im Verhältnis zur Leistung leichter sein und einen besseren Wirkungsgrad haben werden als kleine. Innerhalb gewisser Grenzen ist das auch der Fall. Ein 10 Kwt.-Transformator hat jedenfalls ein kleineres als das 10fache Gewicht von einem 1 Kwt.-Transformator, und sein Wirkungsgrad ist auch besser. Wenn wir jedoch einen 100 Kwt.- und einen 10 Kwt.-Transformator miteinander vergleichen, so tritt der Vorzug des größeren Apparates nicht mehr so auffallend hervor; ja er kann sogar ganz verschwinden. Der Grund dafür liegt in dem Umstande, daß der größere Apparat wegen seiner im Verhältnis zu seinem Volumen kleineren Abkühlungsfläche nicht so stark belastet werden kann als der kleinere, wenn die pro Oberflächeneinheit ausgestrahlte Wärmemenge die gleiche bleiben soll. So lange nun der kleinere von den beiden zu vergleichenden

Transformatoren so geringe lineare Dimensionen hat, daß seine abkühlende Oberfläche im Vergleich zu seiner Leistung sehr reichlich ist, kann man beim größeren Transformator eine größere Erwärmung zulassen und erzielt durch die Vergrößerung der linearen Dimensionen einen erheblichen Vorteil; wenn jedoch der kleinere Apparat solche Dimensionen hat, daß er schon selbst nahe an der Grenze der zulässigen Erhitzung steht, darf diese Grenze beim größeren Apparat auch nicht überschritten werden, und es bietet dann die Vergrößerung der linearen Dimensionen nicht mehr denselben und unter Umständen sogar keinen Vorteil in Bezug auf Materialausnützung.

Ein Beispiel möge dies erläutern. Wir nehmen an, daß der kleine Apparat für eine Leistung von 10 Kwt. gebaut sei und bei Vollbelastung einen Verlust von 400 Watt aufweist, der wie folgt verteilt ist: Hysteresis 200 Watt; Kupferwärme 100 Watt in jedem Stromkreis. Die ganze Abkühlungsfläche sei 16 000 qcm, also 40 qcm pro Watt, was bei Dauerbetrieb einer Temperaturzunahme von etwa 50° C. über die Lufttemperatur entspricht. Die Induktion im Eisen sei $\mathfrak{B} = 5000$. Nun vergrößern wir die linearen Dimensionen des Eisenkernes auf das Doppelte. Bei gleicher magnetischer Beanspruchung würde also der gesamte magnetische Fluß das Vierfache ausmachen, und um die gleichen elektromotorischen Kräfte zu erhalten, brauchen wir nur den vierten Teil der Windungen in jeder Spule. Der Windungsraum ist dabei der Vierfache; es kann also jeder einzelne Draht mit seiner Isolation den 16fachen Raum einnehmen. Da nun die Isolation nicht ganz in dem Verhältnisse verstärkt zu werden braucht, als der Draht selbst, und da man in der Hochspannungsspule rechteckigen anstatt runden Draht verwenden kann, so wird der Querschnitt der Drähte selbst etwas mehr wie das 16fache betragen. Wir wollen der Einfachheit halber auf diesen Umstand vorläufig nicht Rücksicht nehmen, aber beachten, daß das so erhaltene theoretische Ergebnis für den großen Transformator nicht ganz so günstig ausfällt, als der Wirklichkeit entspricht.

Betrachten wir zunächst die Niederspannungswickelung. Die Länge jeder Wickelung ist auf das Doppelte gestiegen; dabei haben wir jedoch nur ein Viertel der Windungen. Die Gesamtlänge ist also nunmehr auf die Hälfte gesunken. Wenn der gleiche Draht verwendet würde, so wäre der Widerstand also die Hälfte.

Nehmen wir an, der kleine Transformator gibt 100 Ampère bei 100 Volt. Die Kupferwärme von $1\% = 100$ Watt würde also einem Widerstand von 0,01 Ohm entsprechen. Der große Transformator mit dem gleichen Draht bewickelt würde mithin in seiner Niederspannungsspule einen Widerstand von 0,005 Ohm haben. Da jedoch der Draht den 16fachen Querschnitt hat, so ist sein Widerstand $\frac{0,005}{16}$ Ohm. Wenn wir zunächst annehmen, daß der Draht gleich beansprucht wird, so würde die sekundäre Stromstärke 1600 Ampère betragen, der Spannungsverlust also 0,5 Volt sein, das heißt nur mehr ein halbes Prozent. Die gleiche Ausführung gilt für die Hochspannungsspule, so daß die ganze Kupferwärme nur mehr 1 % der Gesamtleistung von 160 Kwt., also 1600 Watt ausmacht. Der Hysteresis-Verlust ist im Verhältnis mit dem Gewicht auf das Achtfache angewachsen, beträgt somit auch 1600 Watt. Wir haben also im großen Transformator die gesamten Verluste gleich 3200 Watt und die Leistung gleich 160 Kwt. Die Gesamtverluste machen daher nur 2 % der Leistung aus, gegenüber 4 % im kleinen Transformator. In dieser Beziehung ist der große Transformator bedeutend besser als der kleine, es ist jedoch nicht immer möglich, die Leistungsfähigkeit bei diesem Wirkungsgrad voll auszunützen, weil sich sonst der Apparat zu sehr erhitzen würde. Die Ausnützung könnte allerdings durch Anwendung von besonderen Kühlvorrichtungen möglich gemacht werden. Wir sehen jedoch von diesen vorerst ab. Wir haben angenommen, daß der kleine Transformator eine Abkühlungsfläche von 16 000 qcm hat, also 40 qcm per Watt Verlust bei Dauerbetrieb. Die Temperaturerhöhung war dabei etwa 50° C. Der große Transformator hat die vierfache Abkühlungsfläche und einen achtmal so großen Verlust; seine Abkühlungsfläche ist also nicht mehr 40, sondern nur 20 qcm pro Watt Verlust, was bei Dauerbetrieb eine Temperaturerhöhung von 76° C. herbeiführen würde. Eine solche Erhitzung ist unzulässig, und um sie zu vermeiden, gibt es zwei Mittel. Wir können entweder das Gehäuse des Transformators mit Öl füllen, wodurch eine bessere Abführung der Wärme vom Transformator an die Wände seines Gehäuses erzielt wird und die Temperaturerhöhung bei Dauerbetrieb auf etwa 55° C. vermindert würde, was noch zulässig ist; oder wir müssen, wenn wir nicht zur Kühlung mit Öl greifen wollen, die Belastung soweit vermindern,

dafs die Gesamtverluste nicht mehr als 1600 Watt betragen, wobei die Abkühlungsfläche auf das im kleinen Transformator gegebene Mafs von 40 qcm pro Watt steigt. Um den Vergleich der beiden Transformatoren auf derselben Grundlage durchzuführen, müssen wir das letztere Mittel wählen und jetzt untersuchen, um wieviel die Leistung zu verringern ist, damit die Gesamtverluste halbiert werden. Wir hatten einen Hysteresis-Verlust von 1600 Watt bei $\mathfrak{B} = 5000$. Aus der Kurve Fig. 9 finden wir, dafs bei sehr gutem Eisen jedes Kilogramm bei dieser Induktion und 100 Perioden 1,8 Watt verbraucht. Um den halben Verlust zu haben, müssen wir auf der Kurve jenen Punkt aufsuchen, für welchen der Verlust pro kg nur 0,9 Watt ist. Das ist der Fall für $\mathfrak{B} = 3150$. Um mit dieser Induktion zu arbeiten, müssen wir entweder die Spannung vermindern oder die Windungszahl erhöhen. Wir würden also, wenn wir an der Wickelung nichts ändern, jetzt nicht mehr 100 Volt in der Sekundärspule erhalten, sondern nur $100 \times \frac{3150}{5000} = 63$ Volt, dafür aber den Hysteresisverlust auf die Hälfte reduziert haben. Um die Kupferwärme WJ^2 auch auf die Hälfte zu reduzieren, mufs das Quadrat der Stromstärke auf die Hälfte, die Stromstärke selbst also im Verhältnis $\sqrt{2} : 1$ reduziert werden, was in unserem Falle $1600 : \sqrt{2} = 1135$ gibt. Die Leistung des Transformators ist also jetzt nicht mehr 160 Kwt., sondern blofs $63 \times 1135 = 71,5$ Kwt. In Wirklichkeit wird allerdings die Leistung etwas gröfser ausfallen, weil, wie schon oben erwähnt, das Verhältnis des durch die Isolation verlorenen zu dem mit Kupfer wirklich ausgefüllten Wickelungsraume sich im gröfseren Transformator günstiger stellt. Wie grofs dieser Gewinn ist, mufs für jede Konstruktion durch Zeichnung und Berechnung bestimmt werden. Nehmen wir als einen angenäherten Überschlag an, dafs wir auf diese Weise noch 8,5 Kwt. gewinnen, so würde der grofse Transformator 80 Kwt. im Dauerbetrieb liefern können, und dabei seine Erwärmung nicht gröfser sein als jene des kleinen. Die Leistung ist also auf das Achtfache gestiegen, und da das Gewicht auch achtmal so grofs ist, so ist die Materialausnützung im kleinen und grofsen Transformator dieselbe. Die Vergröfserung der linearen Dimensionen hat in dieser Beziehung keinen Vorteil gebracht. In Bezug auf den Wirkungsgrad ist jedoch ein erheb-

licher Vorteil erzielt worden; denn der 80 Kwt.-Transformator verliert 1600 Watt, also 2 ‰, während der 10 Kwt.-Transformator 4 ‰ verliert. Der Wirkungsgrad ist also von 96 auf 98 ‰ gesteigert worden.

Die Änderung der linearen Dimensionen wird für den großen Transformator bedeutend günstiger, wenn seine Leistung nicht durch das Verhältnis von Abkühlungsfläche und Wattverlust begrenzt wird. Das ist der Fall, einmal wenn der kleine Transformator so geringe Dimensionen hat, daß seine Leistung nicht durch die Frage der Erhitzung, sondern lediglich durch jene nach einem guten Wirkungsgrad begrenzt ist; und ein anderes Mal, wenn man beim großen Transformator künstliche Abkühlungsmittel anwendet. Ist die Abkühlung genügend wirksam, so kann die Leistung im Verhältnis zur vierten Potenz der linearen Vergrößerung gesteigert werden (also in unserem Beispiele von 10 Kwt. auf $10 \times 2^4 = 160$ Kwt.), während das Gewicht sich nur im Verhältnis zur dritten Potenz vergrößert. Die Materialausnützung wird also bei Vergrößerung der linearen Dimensionen günstiger; das heißt, je größer die linearen Dimensionen, desto geringer wird das Gewicht des Transformators per Kwt. Leistung. Dabei ist der prozentuale Effektverlust den linearen Dimensionen umgekehrt proportional.

Wir können in der Ausnützung des großen Transformators jedoch noch einen Schritt weiter gehen. Wir können annehmen, daß wir durch Anordnung besonders wirksamer Kühlvorrichtungen (wie mechanische Zirkulation von Öl unter Anwendung von Kühlwasser in einem äußeren Gefäße) es dahin bringen, die Temperatur selbst bei einer größeren Leistung noch in angemessenen Grenzen zu halten. In diesem Falle können wir also die magnetische Beanspruchung des Eisens und die Stromdichte in den Drähten des großen Transformators noch erhöhen. Nehmen wir an, daß wir die primäre Spannung um so viel erhöhen, daß $\mathfrak{B} = 7300$ wird. Der Hysteresis-Verlust wird dann 3,5 Watt per kg bei 100 Perioden sein und sich für den Transformator von 1600 auf $1600 \cdot \frac{3,5}{1,8} = 3100$ Watt steigern. Die elektromotorische Kraft der Sekundärspule wird dabei von 100 auf $100 \cdot \frac{7300}{5000} = 146$ Volt anwachsen. Wenn wir in der Kupferwärme einen gleichen Zuwachs

als wie in Hysteresis erlauben, so wird die Stromstärke im Verhältnis von $1 : \sqrt{\frac{3100}{1600}} = 1 : 1,39$ steigen. Die Leistung des Transformators ist also jetzt nicht 160 Kwt., sondern

$$\frac{146 \times 1600 \times 1,39}{1000} = 325 \text{ Kwt.}$$

bei einem Gesamtverlust von 6200 Watt. Der Verlust ist also nahezu 2 %, und der Wirkungsgrad ist annähernd der gleiche wie früher. Wir haben durch diese gesteigerte Beanspruchung des Materiales die Leistung verdoppelt, ohne den Wirkungsgrad zu verkleinern. Allerdings ist die Abkühlungsfläche jetzt nicht 40, sondern nur mehr 10 qcm pro Watt Arbeitsverlust, und ein Dauerbetrieb wäre nur unter Anwendung von ganz vorzüglichen Einrichtungen zur Zirkulation und Abkühlung des Öles möglich. Immerhin wird es sich empfehlen, bei sehr grossen Transformatoren solche Kühlvorrichtungen anzubringen, weil deren Kosten im Vergleich zur erzielten Materialersparnis im Transformator selbst nur gering sein können.

Die obige Betrachtung wurde unter der Voraussetzung gemacht, daß das Verhältnis der linearen Dimensionen der zwei Transformatoren 1 : 2 sei. Es wäre natürlich auch möglich gewesen, die gleiche Betrachtung ganz allgemein für ein beliebiges Verhältnis 1 : m anzustellen. Das konkrete Zahlenbeispiel erleichterte jedoch die Betrachtung und wurde aus diesem Grunde gewählt. Wir können jetzt die Ergebnisse ohne weiteres auf den Fall anwenden, wo die lineare Vergrößerung um das m -fache stattfindet, wobei jedoch beachtet werden muß, daß die Ergebnisse nur annähernd und nicht in streng mathematischem Sinne richtig sind. Das kommt teilweise daher, daß wir als Ausgangspunkt des Vergleiches eine bestimmte Induktion für den kleinen Transformator annehmen müssen, deren Wahl natürlich die Rechnung beeinflusst; und teilweise daher, daß bei dem Entwurf des grossen Transformators die Geschicklichkeit des Konstrukteurs auch mitspielt, dieser Faktor aber rechnerisch nicht mit in die Formeln aufgenommen werden kann. Das Ergebnis unserer Betrachtung ist also nur eine erste Annäherung, aber als solche zu vorläufigen Überschlágsrechnungen immerhin nützlich. Wir wollen deshalb die oben gewonnenen Resultate der bequemen Übersicht halber noch tabel-

larisch zusammenstellen. Dabei bedeutet P die Leistung und P_v die Gesamtverluste des kleinen Transformators, S seine Abkühlungsfläche, σ die Abkühlungsfläche für jedes Watt Effektverlust (also $\sigma = \frac{S}{P_v}$) und m das Verhältnis zwischen den linearen Dimensionen des kleinen und großen Transformators. Dann haben wir im großen Transformator drei Fälle zu unterscheiden:

- I. Die Abkühlungsfläche per Watt ist dieselbe, und die Erwärmung beider Apparate ist bei gleicher Kühlmethode dieselbe.
- II. Die magnetische und elektrische Beanspruchung des Materiales ist dieselbe. Bei gleicher Kühlmethode ist die Erwärmung des großen Transformators größer, oder bei gleicher Erwärmung muß die bei ihm angewendete Kühlmethode wirksamer sein.
- III. Die Beanspruchung des Materiales im großen Transformator soll um so viel größer als im kleinen sein, daß die Abkühlungsfläche pro Watt Verlust im Verhältnis $1 : m^2$ kleiner ist als beim Normal-Transformator. Dabei muß natürlich der große Transformator eine besonders wirksame Einrichtung zu seiner Kühlung erhalten.

Bezeichnung der Größen	Kleiner Normal- Transformator	Großer Transformator		
		I	II	III
Lineare Dimension .	l	$l_1 = m l$	$m l$	$m l$
Gewicht	G	$G_1 = m^3 G$	$m^3 G$	$m^3 G$
Abkühlungsfläche . .	S	$S_1 = m^2 S$	$m^2 S$	$m^2 S$
Leistung	P	$P_1 = m^3 P$	$m^4 P$	$m^5 P$
Verlust	P_v	$P_{v1} = m^2 P_v$	$m^3 P_v$	$m^4 P_v$
$S : P_v$	σ	$\sigma_1 = \sigma$	$\frac{\sigma}{m}$	$\frac{\sigma}{m^2}$
Gewicht pro Kilowatt	g	$g_1 = g$	$\frac{g}{m}$	$\frac{g}{m^2}$
Wirkungsgrad . . .	normal	größer größer größer		

Ein Beispiel möge den Gebrauch dieser Tabelle erläutern. Nehmen wir an, wir hätten für einen 5 Kwt.-Transformator bei

95 % Wirkungsgrad eine gute Konstruktion gefunden. Wir betrachten diesen als den Normaltransformator und wünschen die gleiche Konstruktion so zu vergrößern, daß wir einen 15 Kwt.-Transformator erhalten. Zum Ansetzen der Zeichnung ist es also vor allem nötig, die Größe der linearen Dimensionen zu bestimmen.

Wir nehmen an, daß der große Transformator wie der kleine gewöhnliche Luftkühlung haben soll. Es sei im kleinen Transformator $\sigma = 60$, was einer Temperaturerhöhung von 38°C . entspricht. Wir wollen nun im großen Transformator eine Temperaturerhöhung von 55°C . erlauben. Das gibt uns $\sigma_1 = 35$. Nehmen wir vorerst gleiche Materialbeanspruchung an und bestimmen m

aus $m = \frac{\sigma}{\sigma_1} = 1,72$ (Spalte II der Tabelle), so werden wir voraussichtlich zu große Dimensionen und eine zu große Leistung erhalten. Wir finden in der That $P_1 = 5 \times 1,72^4 = 43,5$ Kwt. Wir betrachten jetzt den Transformator von 43,5 Kwt. als den normalen Transformator und bestimmen aus Spalte II die Dimensionen des 15 Kwt.-Transformators. Es ist also $P = 43,5$ und $P_1 = 15$. Daraus

ergibt sich $m = \sqrt[4]{\frac{15}{43,5}} = 0,77$.

Die lineare Dimension des 5 Kwt.-Transformators war l , die des 43,5 Kwt.-Transformators war $1,72 l$. Wir finden somit die lineare Dimension des 15 Kwt.-Transformators $l_1 = l \times 1,72 \times 0,77 = 1,325 l$. Wenn also z. B. die Kerndicke des 5 Kwt.-Transformators 100 mm war, so müßten wir die Zeichnung des 15 Kwt.-Transformators mit einer Kerndicke von rund 133 mm ansetzen.

Zur Kontrolle können wir auch die Kerndicke aus Spalte I bei gleicher Abkühlung berechnen, also für $\sigma_1 = 60$. Wir haben aus $P_1 = m^3 \times 5 = 15$, $m = \sqrt[3]{3} = 1,44$. Die Kerndicke würde also in diesem Falle nicht 133, sondern 144 mm betragen. Der Unterschied kommt daher, daß die größere Dimension für einen Transformator gilt, der bei Dauerbetrieb nicht eine Temperaturerhöhung von 55°C ., wie erlaubt, sondern nur eine solche von 38°C . aufweisen wird. Bei $\sigma_1 = 60$, d. h. bei der kleineren Erwärmung ist das Gewicht des Transformators 3 G; bei $\sigma = 35$, d. h. bei Erwärmung um 55°C . würde das Gewicht nur $1,325^3 G = 2,33 G$ betragen. Wir können durch Zulassung der größeren Erwärmung das Gewicht und annähernd auch die Herstellungs-

kosten des 15 Kwt.-Transformators um $\frac{300 - 233}{300} \times 100 = 22,4\%$ vermindern.

Die Abkühlungsfläche des 5 Kwt.-Transformators war 60 qcm pro Watt, also im ganzen $S = 250 \times 60 = 15000$ qcm. Für den Kern von 133 mm haben wir $S_1 = 15000 \times 1,33^2 = 26500$ qcm, wobei 35 qcm pro Watt entfallen. Wir haben also einen Gesamtverlust von $26500 : 35 = 760$ Watt, d. h. ungefähr 5% der Gesamtleistung. Wenn wir jedoch den größeren Kern verwenden, so ist $P_{v1} = 1,44^2 \times 250 = 520$ Watt, also nur 3½% der Gesamtleistung. Wir können jetzt die gefundenen Werte wie folgt tabellarisch zusammenstellen. Um eine Grundlage zum Vergleich der Gewichte zu haben, nehmen wir an, daß der 5 Kwt.-Transformator 20 kg pro Kilowatt wiegt.

Bezeichnung der Größen	Transformator von		
	5 Kwt.	15 Kwt.	15 Kwt.
Kerndicke mm	100	133	144
Gesamtgewicht kg . . .	100	233	300
Gewicht pro Kilowatt kg	20	15,6	20
Temperaturerhöhung °C. .	38	55	38
Wirkungsgrad %	95	95	96,5

Der Konstrukteur hat jetzt beim Ansetzen der Zeichnung zu entscheiden, ob er die größere oder kleinere Kerndicke wählt. Dieselbe größer zu machen als 144 mm, würde einen zu schweren Apparat geben, während eine kleinere Kerndicke als 133 mm die Anwendung besonderer Kühlvorrichtungen nötig machen würde, deren Kosten im Vergleich mit den Kosten des Apparates selbst doch ziemlich beträchtlich sein würden. Die Wahl liegt also zwischen den in der Tabelle angeführten Grenzen und muß lediglich mit Rücksicht auf die Herstellungskosten und den Wirkungsgrad getroffen werden. Handelt es sich hauptsächlich um eine leichte und billige Konstruktion, so wird man die kleinere Kerndicke wählen; handelt es sich hauptsächlich darum, den Wirkungsgrad möglichst groß zu machen, so wird man die größere Kerndicke wählen.

Der praktische Nutzen der hier angestellten Betrachtung über den Einfluß der linearen Dimensionen liegt hauptsächlich darin, daß dadurch dem Konstrukteur ein Mittel gegeben wird, ohne

langwieriges Herumtasten sofort die Zeichnung eines neuen Transformators anzusetzen, wenn jene eines guten Transformators anderer Gröfse vorliegt.

Viertes Kapitel.

Arbeitsleistung eines Wechselstromes. — Zusammensetzung von Strömen oder Spannungen. — Bestimmung des Leerlaufstromes. — Einfluß von Stöfugen.

Arbeitsleistung eines Wechselstromes. Um die Leistung eines Transformators beurteilen zu können, ist es zunächst notwendig, den Effekt zu messen, welcher der Primärspule zugeführt und von der Sekundärspule abgegeben wird. Wir müssen also imstande sein, die durch irgend einen Wechselstrom dargestellte Energie durch einen geeigneten Apparat entweder direkt zu messen oder aus anderen Beobachtungen zu berechnen. Wir nehmen dabei vorläufig an, daß sowohl der Strom selbst als auch die Spannung sich nach dem Sinusgesetz ändern. Diese Annahme geschieht lediglich, um die mathematische Behandlung des Gegenstandes einfach und übersichtlich zu machen. Sie trifft in Wirklichkeit nur selten zu, wir werden jedoch später sehen, daß die unter dieser Annahme entwickelten Methoden zur Arbeitsmessung auch dann angewendet werden können, wenn der Strom und seine Spannung nicht sinusartig, sondern beliebig verlaufen, solange nur die Periodenzahl beider die gleiche ist.

Es stelle die Sinuslinie I in Fig. 30 die jeweilige Stromstärke als Funktion der Zeit dar, und die Linie E die Spannung zwischen

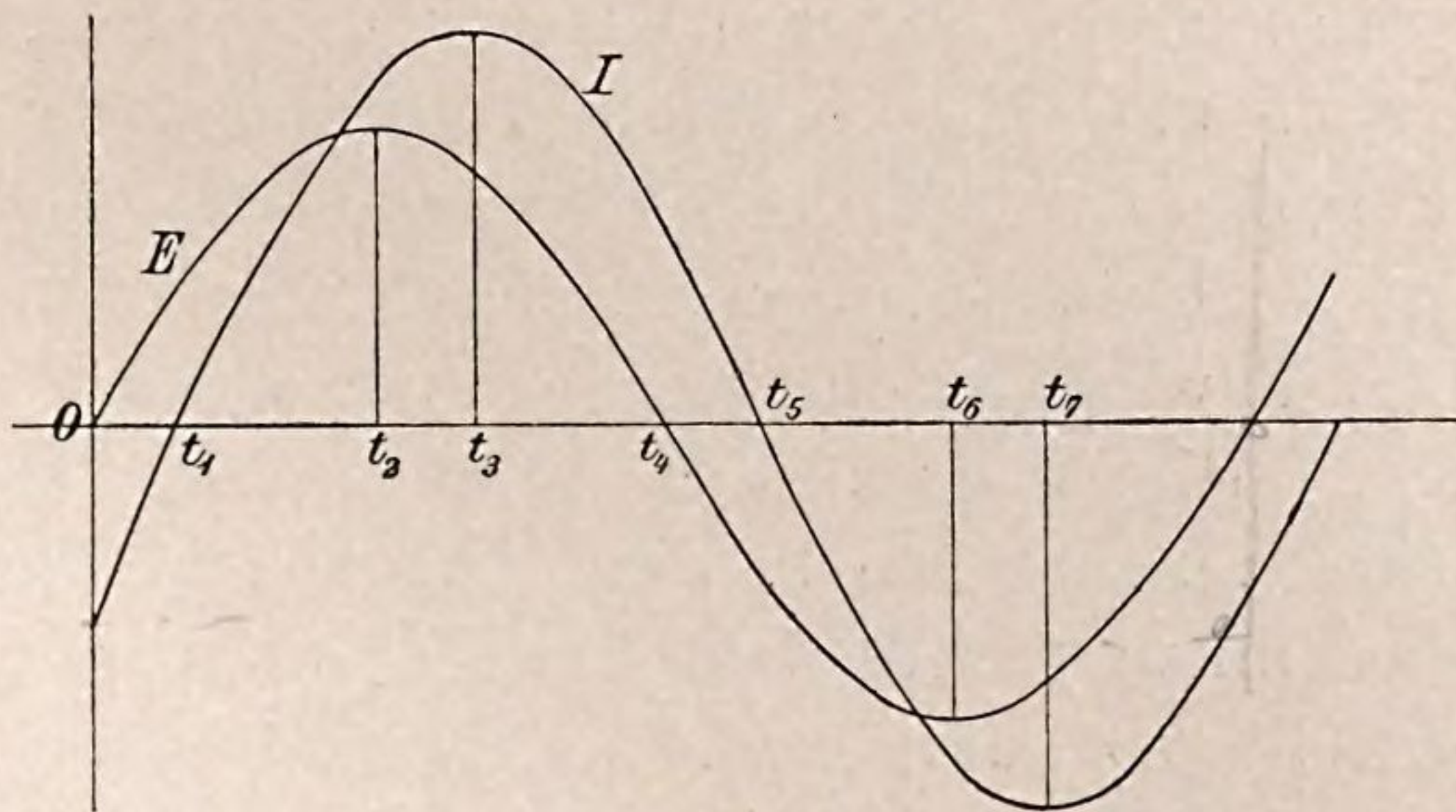


Fig. 30.

zwei Punkten eines Stromkreises, also z. B. zwischen den Klemmen der Primärspule eines Transformators. Dabei zählen wir die Zeit

von links nach rechts. Zur Zeit 0 ist die Stromstärke negativ (unter der Abscissenachse), und die Spannung ist 0. Zur Zeit t_1 ist die Stromstärke 0, und die Spannung hat einen positiven Wert. Zur Zeit t_2 erreicht die Spannung ein positives Maximum. Die Stromstärke erreicht ihr positives Maximum etwas später, nämlich zur Zeit t_3 . Bei t_4 ist die Spannung auf 0 gesunken, die Stromstärke ist jedoch noch positiv, aber im Abnehmen begriffen. Sie wird 0 bei t_5 , zu welcher Zeit die Spannung schon negativ ist. Da unserer Annahme gemäß beide Kurven nach einem einfachen Sinusgesetz verlaufen, so muß die Entfernung ihrer Nullpunkte sowohl als ihrer Maxima stets die gleiche bleiben, das heißt, die Zeitunterschiede zwischen den betreffenden Punkten müssen dieselben sein: $t_3 - t_2 = t_5 - t_4 = t_7 - t_6$ etc. Dieser Zeitunterschied zwischen den entsprechenden Werten von Strom und Spannung wird als zeitliche Nach- oder Voreilung bezeichnet. In unserem Falle, wo die Spannung die Null- und Maximalwerte früher erreicht als der Strom, hat der Strom Nacheilung im Vergleich zur Spannung; oder man kann auch sagen, daß die Spannung dem Strome voreilt. Bedingung für dieses relative Verhältnis ist, daß in dem beobachteten Teil des Stromkreises eine elektromotorische Kraft thätig ist, welche sich der Änderung der Stromstärke widersetzt. Eine solche elektromotorische Kraft wird z. B. durch die Änderung in dem vom Strome selbst erzeugten Kraftlinienfluß hervorgerufen. Ist jedoch in dem betrachteten Teil des Stromkreises eine elektromotorische Kraft im entgegengesetzten Sinne thätig, so wird sowohl das Anwachsen als auch das Abnehmen der Stromstärke dadurch begünstigt, und der Strom erreicht seine Null- und Maximalwerte früher als die Spannung. Wir haben also dann zeitliche Voreilung des Stromes gegenüber der Spannung. Eine solche in der Stromrichtung wirkende elektromotorische Kraft wird durch Einschaltung eines Kondensators hervorgebracht. Die Platten des Kondensators erhalten den stärksten positiven Ladestrom in dem Augenblicke, wo die Spannung zwischen ihnen 0 ist. Hat diese Spannung ihr positives Maximum erreicht, so kann keine weitere Ladung erfolgen, und der Ladestrom wird Null. Bei Abnahme der positiven Spannung tritt sofort ein negativer oder Entladestrom auf, der bei der Spannung 0 sein Maximum erreicht u. s. w. Wir sehen daraus, daß der Strom der zwischen den Platten herrschenden Spannung

um eine viertel Periode voreilt. Nun ist noch der Fall denkbar, daß außer der Klemmenspannung im betrachteten Teil des Stromkreises keine elektromotorische Kraft wirkt, daß also der Strom weder zeitlich beschleunigt noch zeitlich verzögert wird. Dieser Fall tritt ein, wenn der Stromkreis nur ohmschen Widerstand hat, z. B. Glühlampen, welche von den Sekundärklemmen des Transformators gespeist werden. Dann decken sich die Nullpunkte beider Kurven, das heißt t_5 fällt mit t_4 zusammen, t_3 mit t_2 und

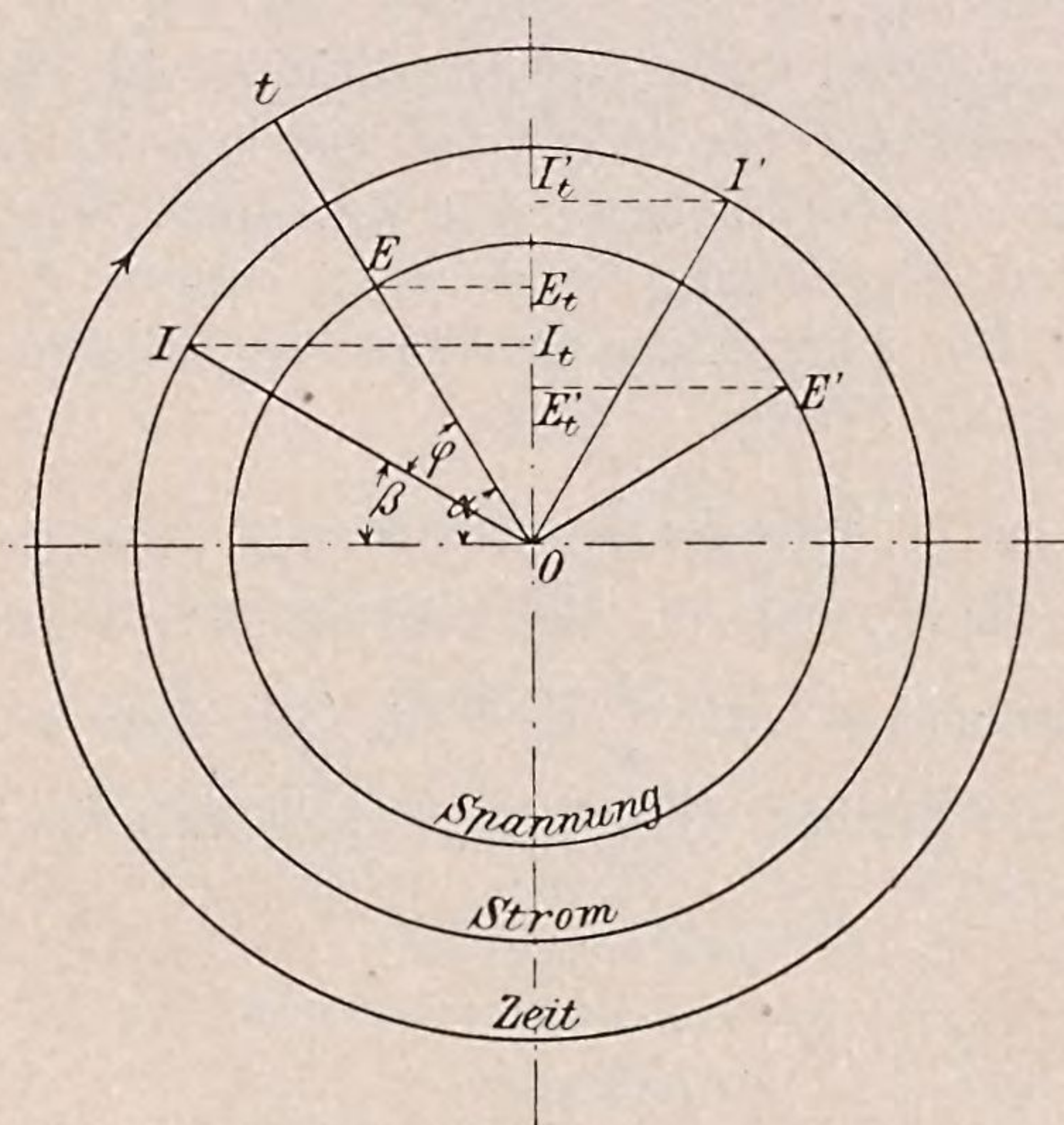


Fig. 31.

so weiter. Man kann den periodischen Verlauf der Stromstärke und Spannung bequem in einem Vektordiagramm darstellen. Es diene der äußere Kreis in Fig. 31 zur Zeitmessung (etwa wie das Zifferblatt einer Uhr), und Ot sei der Uhrzeiger, der sich in der Pfeilrichtung mit konstanter Winkelgeschwindigkeit dreht. Wir zählen dabei die Zeit von dem Augenblicke an, wo der Zeiger horizontal und zwar links steht. In diesem Augenblicke geht die Spannung durch Null. Wenn man nun einen Kreis beschreibt, dessen Radius nach einem willkürlich gewählten Maßstab den Maximalwert der Spannung darstellt, so gibt die Projektion des innerhalb des Kreises liegenden Teiles des Uhrzeigers (Spannungsvektor) den jeweiligen Wert der Spannung im selben Maßstab an.

Es ist also zur Zeit t die Spannung gleich $O E_t$, wobei wir die Spannung als positiv betrachten, wenn E_t über, und als negativ, wenn E_t unter O liegt.

In der gleichen Weise kann die Stromstärke dargestellt werden, nur muß man sich den betreffenden Stromvektor $O I$ um den konstanten Nacheilungswinkel $E O I = \varphi$ zurückgestellt denken. Die zwei Vektoren drehen sich in derselben Richtung mit gleicher Geschwindigkeit und behalten somit immerwährend ihre gegenseitige Winkelstellung φ bei. Nehmen wir an, der Vektor $O E$ schliesse nach der Zeit t mit der Horizontalen den Winkel α ein, so wird der Zeiger $O I$ zur selben Zeit mit der Horizontalen den Winkel $\beta = \alpha - \varphi$ einschließen. Die augenblicklichen Werte der Spannung und Stromstärke sind dann bezw. $E \sin \alpha$ und $I \sin (\alpha - \varphi)$. Der augenblickliche Wert des Effektes ist das Produkt dieser beiden Werte

$$P = E I \sin \alpha \sin (\alpha - \varphi).$$

Nehmen wir an, daß die Vektoren in einer Sekunde ∞ Umdrehungen machen, so daß $\frac{1}{\infty} = T$ die Zeit einer vollen Periode bezeichnet, und nennen wir die Winkelgeschwindigkeit ω , so ist offenbar

$$\omega T = 2\pi$$

$$\alpha = \omega t$$

$$d\alpha = \omega dt$$

$$d\alpha = 2\pi \infty dt.$$

Da die Arbeit das Produkt von Effekt und Zeit ist, so haben wir die in der Zeit dt geleistete Arbeit

$$dA = P dt.$$

Wenn wir nun die Strom- und Spannungskurven aufzeichnen (Fig. 32) und das Produkt ihrer Ordinaten bilden, so erhalten wir eine dritte Kurve P , deren Ordinaten den augenblicklichen Effekt, und deren Fläche die Arbeit darstellt. Soweit diese Kurve oberhalb der Abscissenachse liegt, stellt sie positive, also dem Stromkreis zugeführte Arbeit dar; unterhalb der Achse liegende Teile der Kurve (die kleinen schraffierten Teile) stellen negative, d. h. vom Stromkreis wieder abgegebene Arbeit dar. Wollen wir die während einer vollen Periode aufgenommene Arbeit bestimmen,

so muß die Messung der Flächen zwischen den Ordinaten $t=0$ und $t=T$ geschehen, wobei die unterhalb der Horizontalen liegenden Flächen als negativ zu nehmen sind.

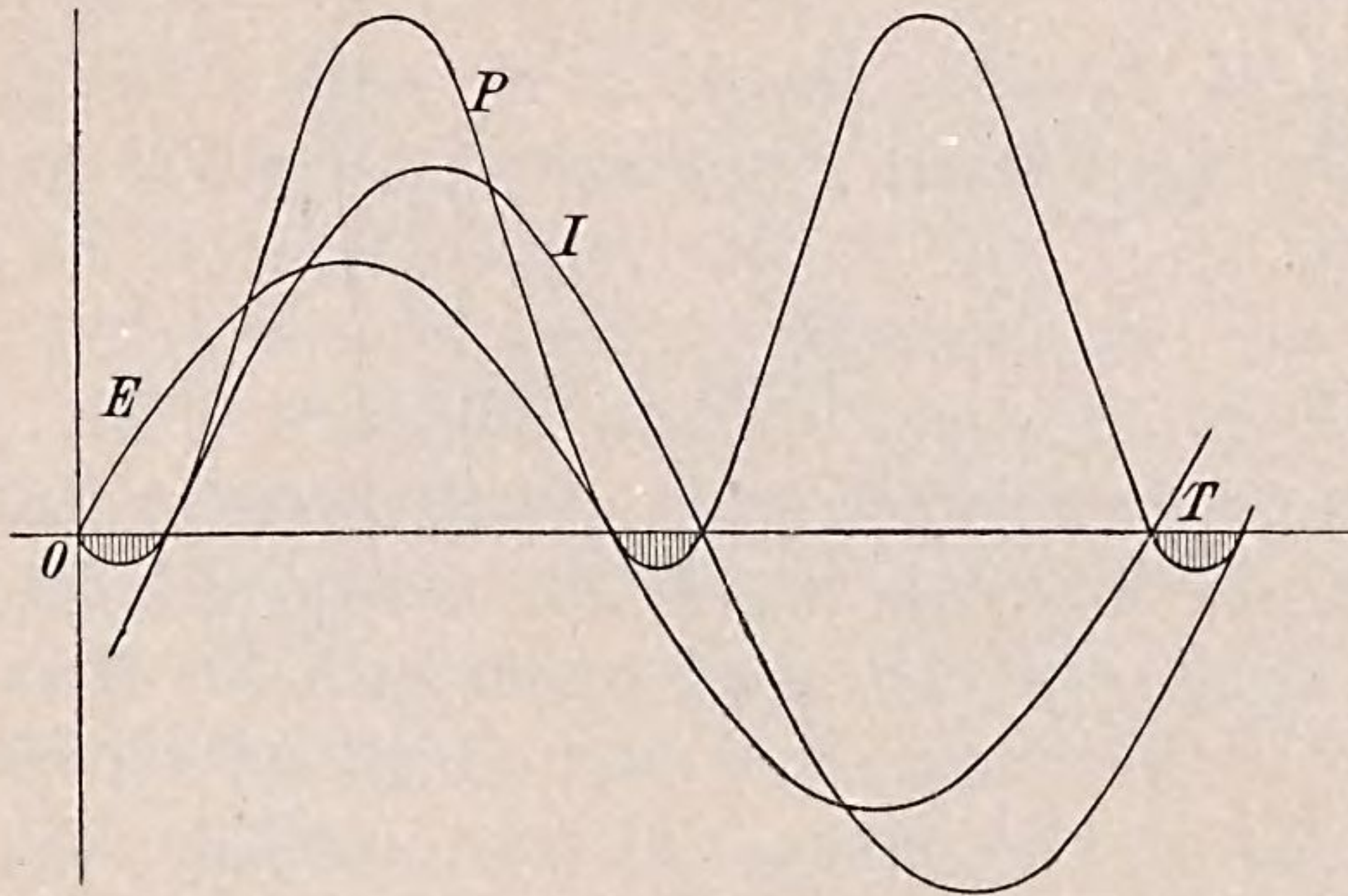


Fig. 32.

Die Arbeit während einer vollen Periode ist also

$$A = \int_0^T P dt.$$

Der augenblickliche Effekt schwankt, wie man aus den Kurven sieht, zwischen einem kleinen negativen und einem großen positiven Werte. Wir können uns nun vorstellen, daß wir diese veränderliche Leistung durch eine Dauerleistung ersetzen (etwa durch einen konstanten Gleichstrom), welche in der Zeit T genau so viel Arbeit liefert als der Wechselstrom; dann ist offenbar diese mittlere oder effektive Leistung der Quotient aus der Arbeit des Wechselstromes während einer Periode und der Zeitdauer der Periode

$$P = \frac{A}{T}$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T P dt.$$

Mit Einsetzung der obigen Werte kann dieser Ausdruck auch in folgender Form geschrieben werden:

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} EI \sin \alpha \sin (\alpha - \varphi) d\alpha,$$

deren Integration ergibt

$$P = \frac{1}{2} EI \cos \varphi.$$

Das gleiche Resultat erhalten wir nach Blakesley durch eine geometrische Methode mit Benützung des Vektordiagrammes. Seien in Fig. 31 E und I die augenblicklichen Stellungen der Spannungs- und Stromvektoren, also $E \sin \alpha$ $I \sin \beta$ der augenblickliche Effekt. Um den mittlern Effekt zu finden, würden wir den Kreis in eine genügend große Anzahl gleicher Teile einteilen, die Vektoren in ihren diesen Teilen entsprechenden Stellungen zeichnen, ihre Projektionen bestimmen und die Summe der Produkte dieser Projektionen durch ihre Anzahl dividieren.

Anstatt nun die Stellungen in ihrer richtigen Reihenfolge zu addieren, können wir dieselben paarweise zusammenfassen, indem wir je zwei um 90° verschiedene Stellungen als einen Summanden in der Reihe ansehen. Dadurch wird natürlich jede Stellung zweimal gezählt und um den richtigen Mittelwert zu erhalten, müssen wir die Gesamtsumme durch die doppelte Anzahl der Kreisteile dividieren. Bedeutet m diese Anzahl, so ist also der mittlere Effekt

$$P = \frac{1}{m} \Sigma (EI \sin \alpha \sin \beta),$$

wobei die Anzahl der Summanden m ist. Wenn wir statt einfacher konjugierte Stellungen zählen, so ist aus Fig. 31

$$P = \frac{1}{2m} \Sigma (EI \sin \alpha \sin \beta + EI \cos \alpha \cos \beta),$$

wobei wieder die Anzahl der Summanden m ist. Der Ausdruck unter dem Summationszeichen ist aber offenbar gleichwertig mit $EI \cos (\alpha - \beta) = EI \cos \varphi$ und ist von der Stellung, d. h. von den speziellen Werten der Winkel α und β unabhängig. Die Summation ergibt also einfach $m EI \cos \varphi$, und dieser Wert in die Gleichung für P eingesetzt gibt

$$P = \frac{m}{2m} EI \cos \varphi$$

$$P = \frac{1}{2} EI \cos \varphi.$$

Dabei sind E und I die Maximalwerte der Spannung und Stromstärke. Wenn wir die effektiven Werte mit e und i bezeichnen, so bestehen, wie früher gezeigt, die Beziehungen $e = \frac{E}{\sqrt{2}}$, $i = \frac{I}{\sqrt{2}}$, und wir können den mittleren Effekt auch wie folgt ausdrücken:

$$P = ei \cos \varphi.$$

In diesem Ausdrucke ist φ der Verschiebungswinkel zwischen Strom und Spannung. Der Effekt bei gegebener Stromstärke und Spannung wird ein Maximum, wenn der Verschiebungswinkel 0 ist, wenn also die Spannung mit dem Strom der Phase nach übereinstimmt. Der Effekt wird Null, wenn die Verschiebung 90° beträgt.

Da $i \cos \varphi$ die Projektion des Stromvektors auf den Spannungsvektor ist, so können wir den Effekt graphisch durch die Fläche eines Rechteckes darstellen, dessen eine Seite die effektive Spannung und die andere Seite die Projektion des effektiven Stromvektors auf den Spannungsvektor ist. Oder wir projizieren den Spannungsvektor auf den Stromvektor und bilden das Rechteck aus dieser Projektion und der Länge des Stromvektors. Die Fläche

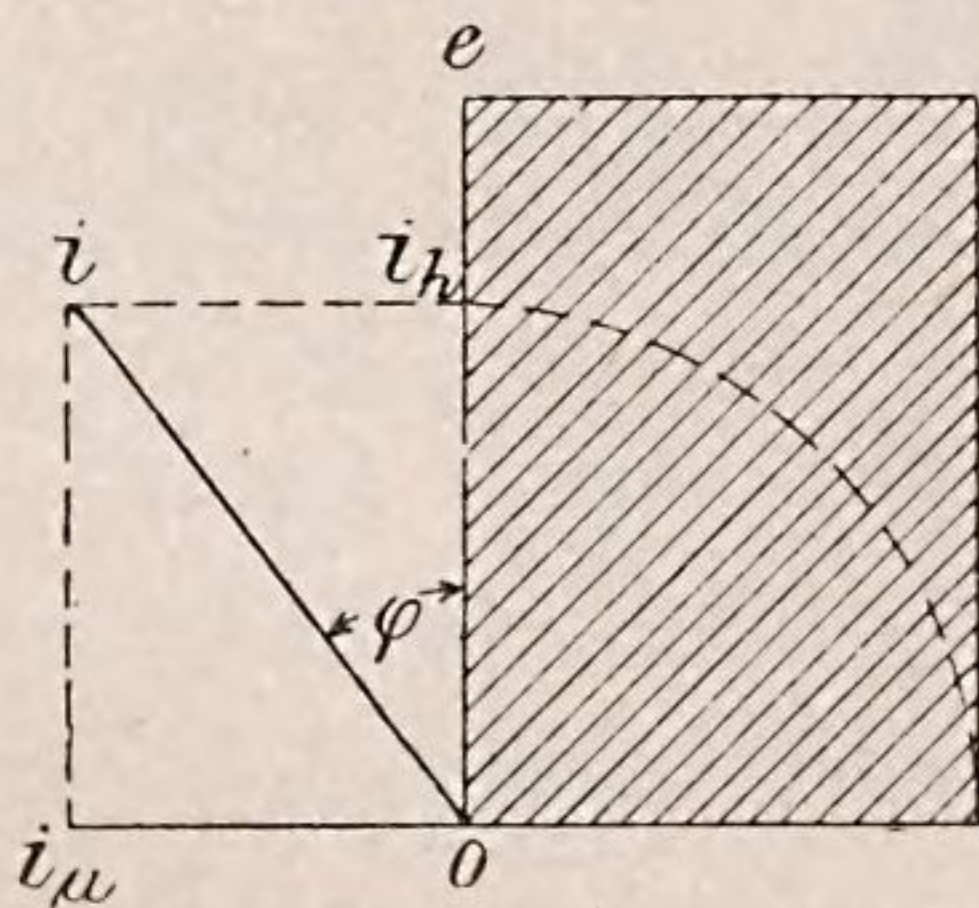


Fig. 33.

gibt den Effekt. Natürlich muß bei der Flächenbestimmung auf den Maßstab, in welchem die Vektoren gezeichnet sind, Rücksicht genommen werden. Wenn z. B. in beiden 1 mm 1 Ampère bzw. 1 Volt darstellt, so bedeutet jeder qmm der Fläche ein Watt. Wird jedoch der Strom im Maßstab von 1 mm pro Ampère und die Spannung im Maßstab von 1 mm pro 100 Volt aufgetragen, so stellt jeder qmm der Fläche eine Leistung von 100 Watt dar. In Fig. 33 sei Oi die effektive Stromstärke und Oe die effektive

Spannung, welche um den Winkel φ voreilt; dann stellt das schraffierte Rechteck den Effekt dar. Dieser ist gleichwertig mit jenem eines Stromes i_n , welcher unter der Spannung e fließt, aber keine Phasenverschiebung hat. Wir können uns demnach den wirklichen Strom Oi als aus zwei rechtwinkligen Komponenten bestehend denken; die eine Oi_n hat die gleiche Phase wie die Spannung, und die andere Oi_μ bleibt hinter der Spannung um 90° zurück. Die Komponente i_n bildet den wirklich Arbeit leistenden Teil des Stromes, während die Komponente i_μ keine Arbeit leistet. Es ist das die sogenannte wattlose Komponente des Stromes, während Oi_n die Wattkomponente des Stromes ist.

Die Zusammensetzung von Strömen oder Spannungen. Wir haben hier das bekannte Kräfteparallelogramm auf die Zusammensetzung von Strömen verwendet, und da taucht die Frage auf, ob dieser Vorgang nicht nur in dem betrachteten Falle, sondern auch im allgemeinen gestattet ist. Wir setzen dabei natürlich voraus, daß wir es mit zwei Strömen von Sinus-Form und gleicher Periode, aber verschiedener Phase und verschiedener Stärke zu thun haben. Nehmen wir an, daß die zwei

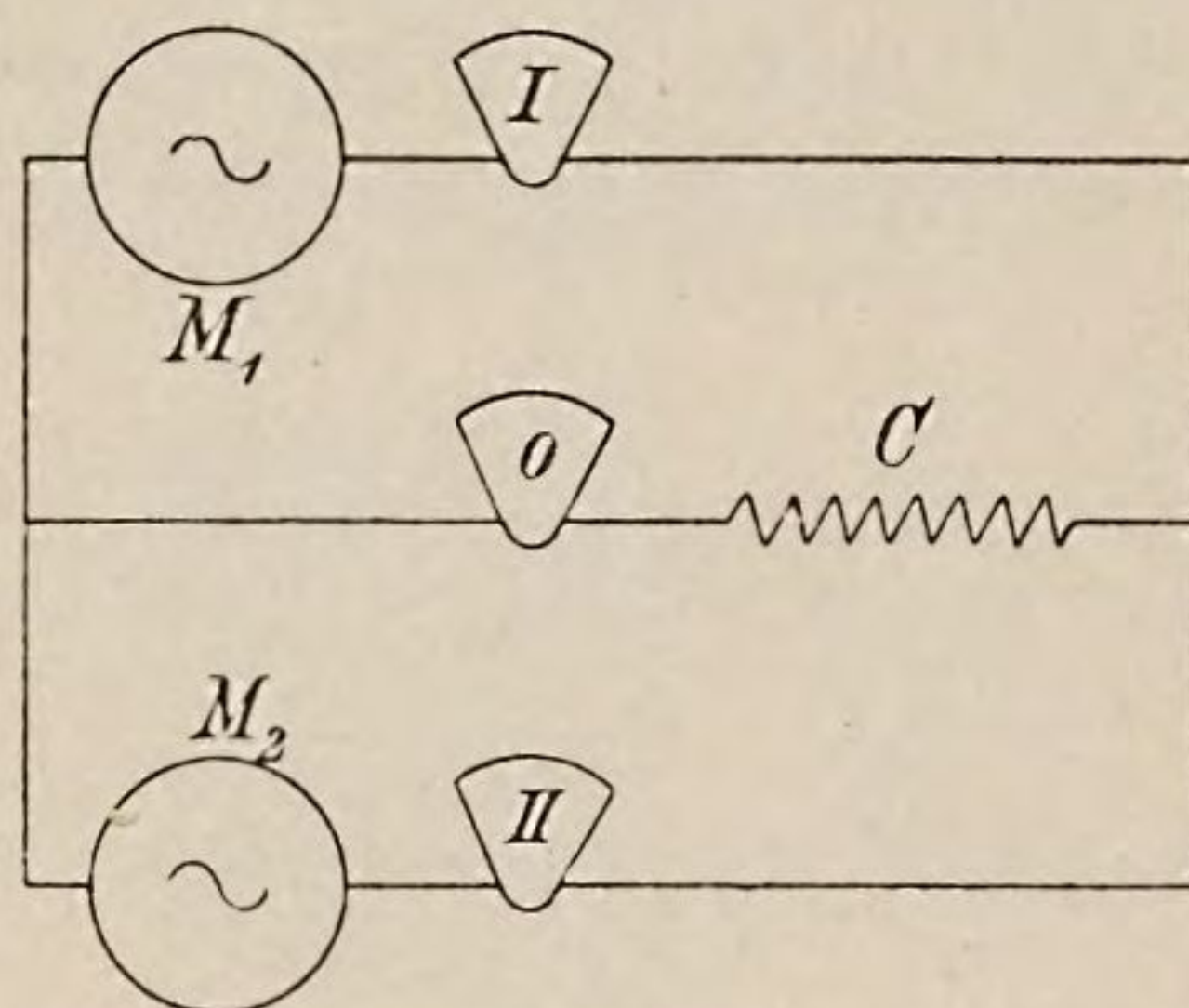


Fig. 34.

Ströme durch zwei Wechselstrom-Maschinen M_1 M_2 (Fig. 34) erzeugt werden. Zur Messung der einzelnen Ströme dienen die Ampèremeter I u. II , während der resultierende Strom durch das Ampèremeter 0 angezeigt wird. Die Maschinen seien mechanisch gekuppelt, so daß ihre Ströme gleiche Periodenzahlen haben. Es handelt sich nun darum, den durch den Leiter C fließenden und im Instrumente 0 angezeigten Strom zu bestimmen, wenn die Stromstärke und gegenseitige Phasenverschiebung der Einzelströme gegeben sind. Im Vektordiagramm (Fig. 35) seien I' u. I''

die Maximalwerte der Ströme. In dem Augenblicke, welcher der gezeichneten Stellung der Vektoren entspricht, ist Oi'' der von der Maschine M_2 und Oi' der von der Maschine M_1 durch den Leiter C geschickte Strom. Der gesamte diesen Leiter durchfließende Strom ist die Summe dieser beiden, also $Oi'' + Oi'$. Bilden wir nun das Parallelogramm $OI'II''$, so ist sofort klar, daß die vertikale Entfernung zwischen den Punkten I und I' gleich der Höhe des Punktes I'' über der Horizontalen ist. Die Länge der Strecke Oi ist also gleich der Summe von Oi'' und Oi' , d. h. Oi ist der in diesem Augenblicke durch den Leiter C fließende Strom.

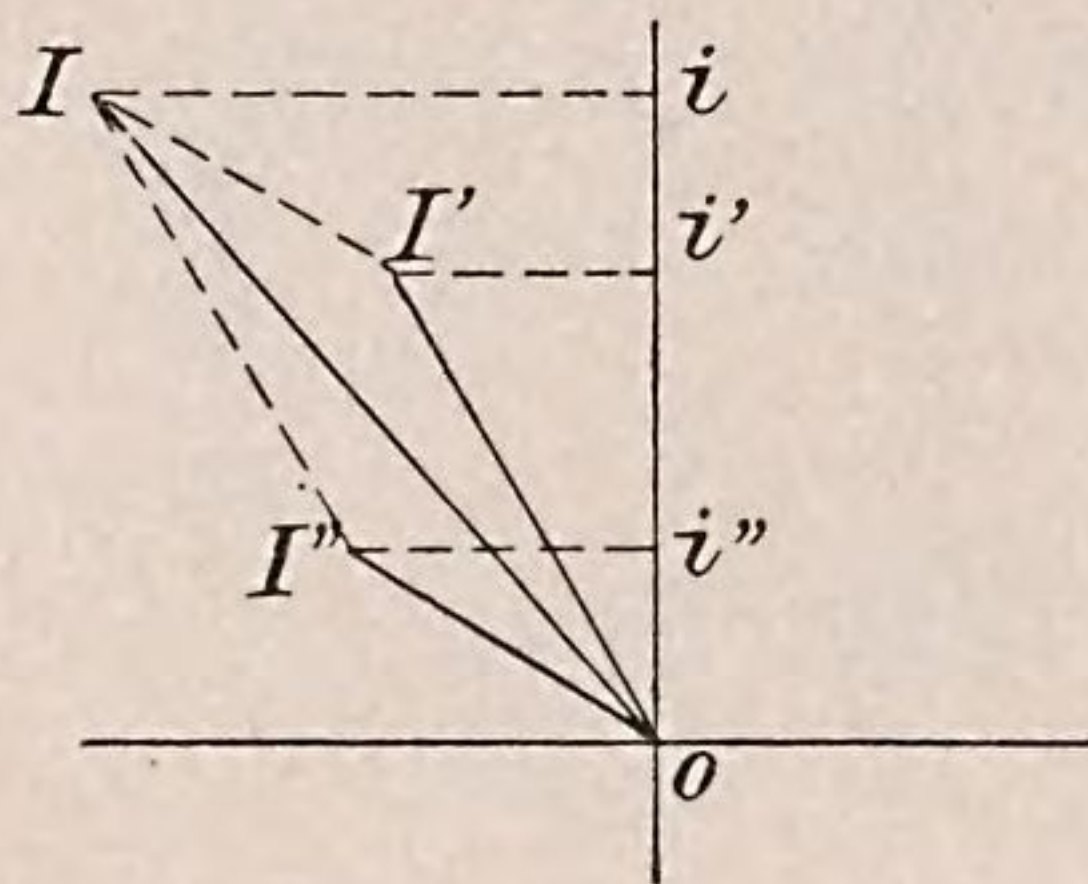


Fig. 35.

Diese Länge Oi ist aber die Projektion der Resultante OI , und da diese Beziehung für jede Stellung der Vektoren gilt, so finden wir allgemein, daß die Projektion der Resultante der Maximalströme den jeweilig fließenden Strom im Leiter C darstellt. Wir können uns also vorstellen, daß der Leiter C von einem einzigen Strom durchflossen wird, dessen Maximalwert die Resultante der beiden Ströme ist, und dessen Phase zwischen jenen der beiden Ströme liegt. Wir können uns nun alle Längen im Vektordiagramm im Verhältnis von $1 : \sqrt{2}$ verkleinert denken. Dadurch wird an den Winkeln und an dem gegenseitigen Verhältnis der Größen nichts geändert; wir erhalten aber dann den effektiven Wert des resultierenden Stromes. Es ist auch klar, daß die gleiche Betrachtung auf mehr als zwei Ströme ausgedehnt werden kann, indem wir zunächst die Resultante von zwei Strömen bilden, diese dann mit dem dritten Strom zu einer neuen Resultante zusammensetzen und so weiter. Wir brauchen übrigens die Parallelogramme nicht vollständig zu zeichnen, sondern können die Ströme nach Art des Seilpolygones einfach an einander reihen. Die Schlusslinie des Seilpolygones gibt dann die Resultante aller Ströme.

Dabei ist natürlich die Richtung der einzelnen Ströme zu beachten. Seien z. B. in Fig. 36 die Ströme i_1 bis i_4 der Richtung, Stärke

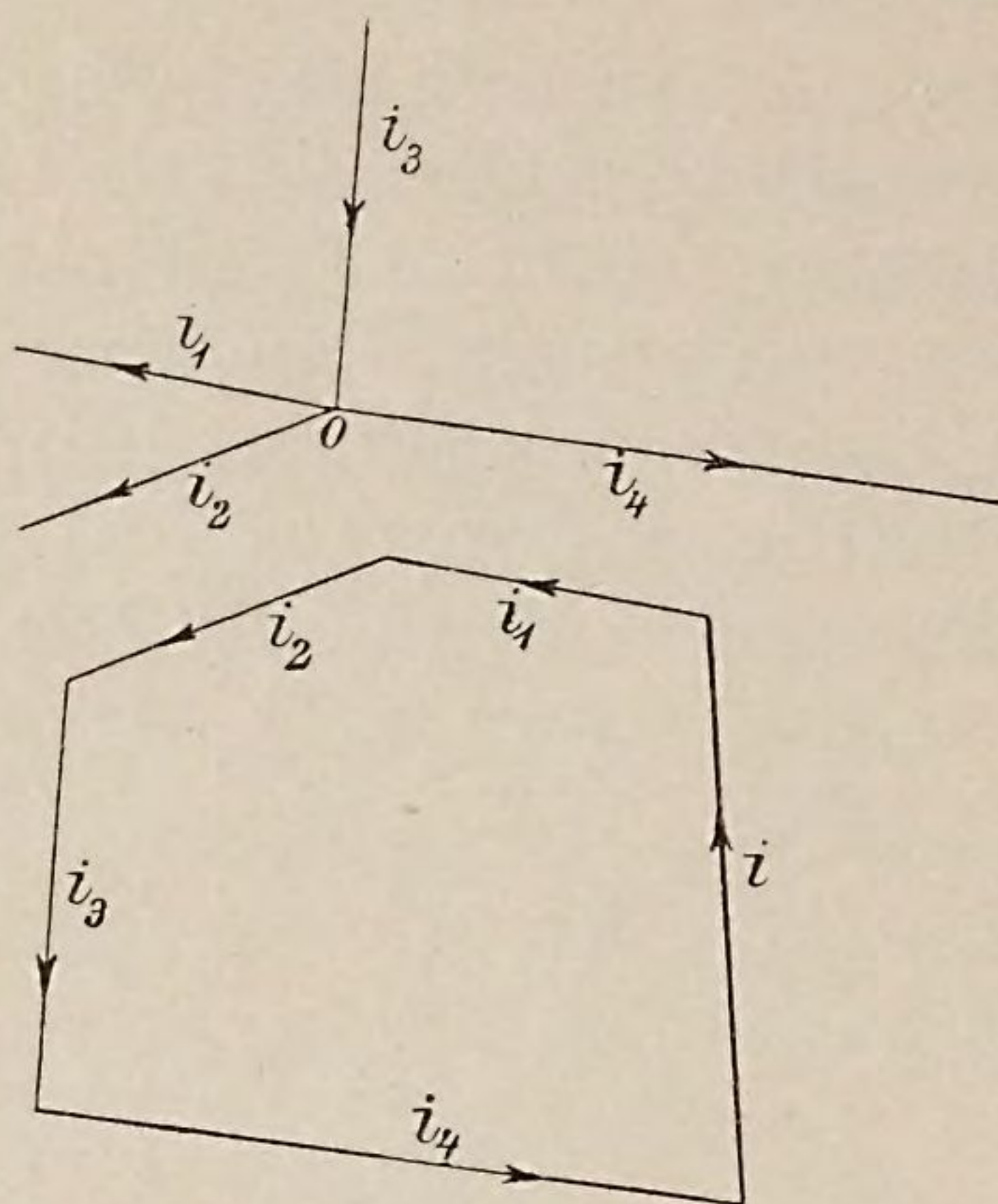


Fig. 36.

und Lage nach verzeichnet, so gibt die Zusammensetzung nach dem Seilpolygone die Resultierende i der Richtung, Stärke und Lage nach.

Ebenso können elektromotorische Kräfte zu einer Resultierenden zusammengesetzt werden. Denken wir uns zwei Wechselstrom-Maschinen M_1 , M_2 in Serienschaltung angeordnet, Fig. 37,

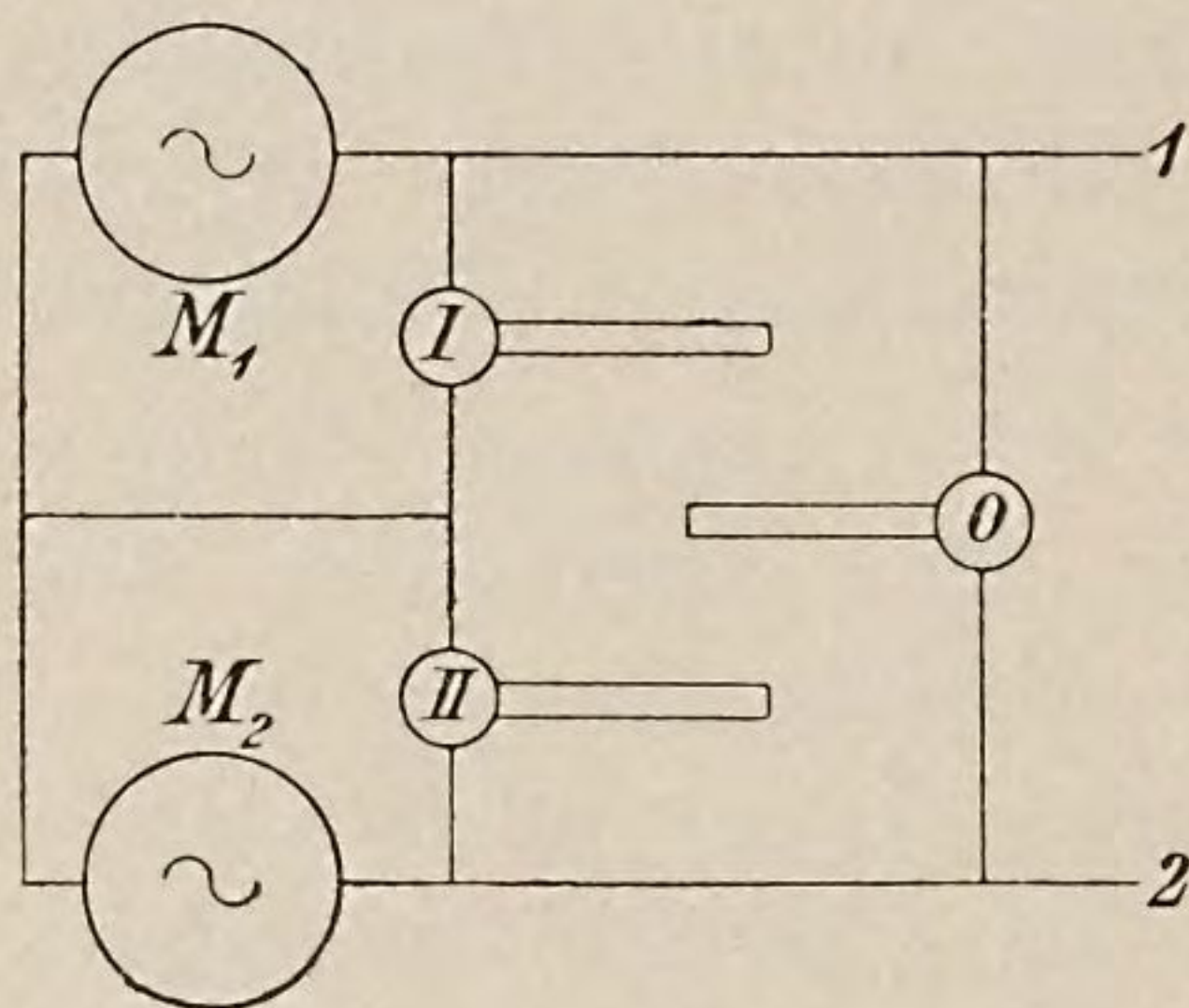


Fig. 37.

und deren Klemmenspannung mittels der Voltmeter I und II gemessen. Wenn wir nun zwischen die Außenleiter 1, 2 ein Voltmeter 0 einschalten, so gibt dieses uns nicht die arithmetische Summe der Ablesungen von I und II, sondern die Resultierende,

deren absolute GröÙe nicht nur von den Spannungen, welche beide Maschinen erzeugen, sondern auch von der Phasenverschiebung zwischen beiden Spannungen abhängt. Nach dem, was oben für die Zusammensetzung von Strömen ausführlich entwickelt wurde, kann die Zusammensetzung von Spannungen als selbstverständlich angenommen werden. Es ist auch ohne weiteres klar, daß wir aus den drei Voltmeter-Ablesungen unmittelbar die Phasenverschiebung ermitteln können. Sei Oe_1 (Fig. 38) die

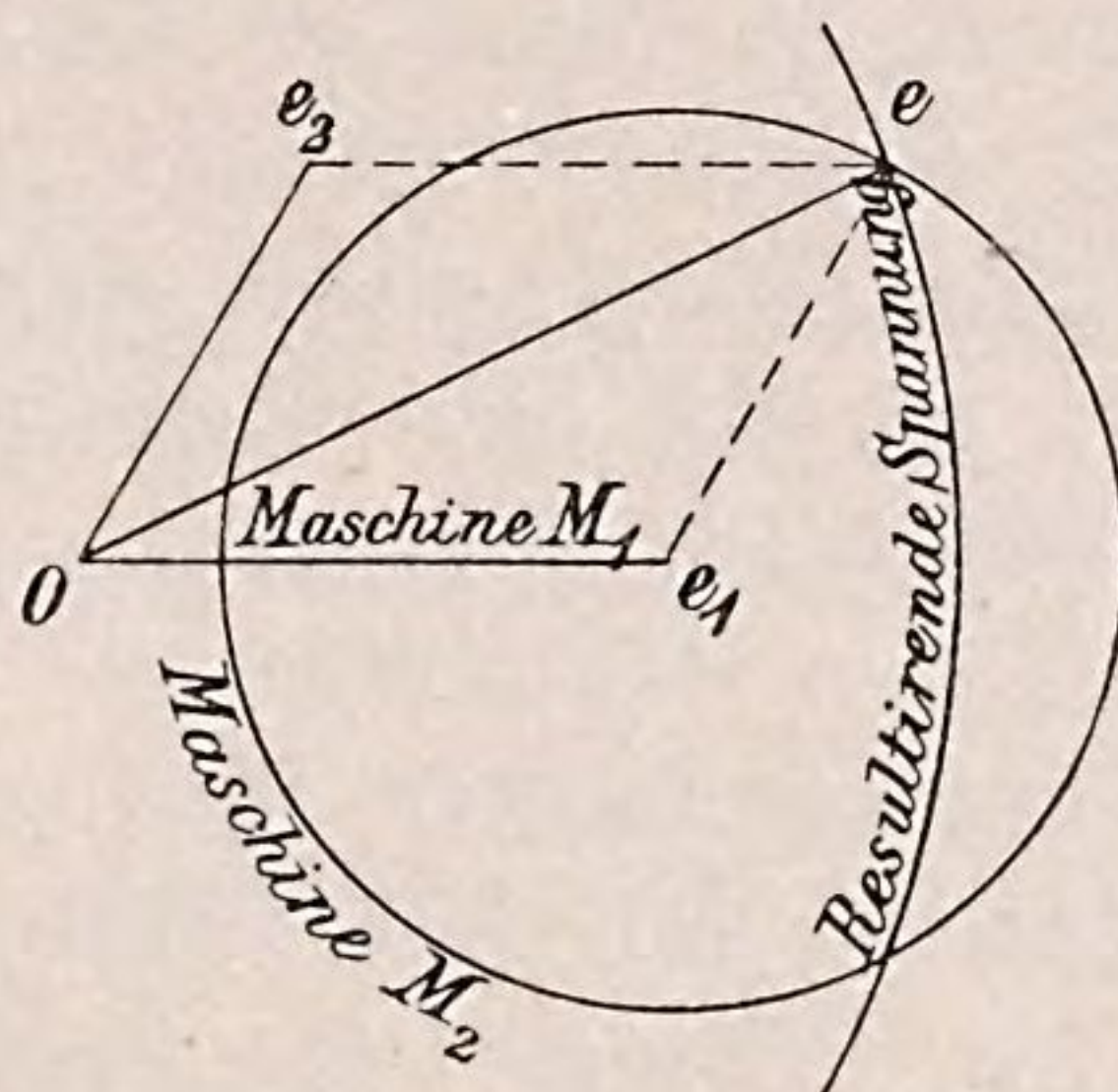


Fig. 38.

am Instrumente I abgelesene Spannung, und beschreiben wir um e_1 als Mittelpunkt einen Kreis, dessen Radius gleich der an II abgelesenen Spannung ist, ferner einen Kreis um O mit einem Radius, der gleich der resultierenden Spannung ist, so muß einer der Schnittpunkte der beiden Kreise der Endpunkt der Resultante sein. Welcher von beiden Schnittpunkten zu wählen ist, hängt davon ab, ob M_1 oder M_2 voreilt. Wenn M_1 voreilt, so muß der Vektor von M_2 hinter (also oberhalb) Oe_1 liegen; es ist also der obere Schnittpunkt zu nehmen. Die Phasenverschiebung zwischen den Spannungen beider Maschinen wird nun durch den Winkel $e_1 Oe_2$ gegeben.

Bestimmung des Leerlaufstromes. Im Obigen wurden die Grundsätze entwickelt, auf welchen die Bestimmung der Arbeitsleistung eines Wechselstromes beruht. Praktische Methoden zur wirklichen Messung werden später behandelt, ebenso wie die Ausdehnung dieser Methoden auf Ströme von nicht sinusoidaler, sondern unregelmäßiger Form. Das Vorhergehende genügt jedoch zur Bestimmung des Leerlaufstromes bei Transformatoren, und wir wollen vorerst diesen Gegenstand behandeln, weil es von großer praktischer Wichtigkeit ist, die Transformatoren so zu

konstruieren, daß ihr Leerlaufstrom möglichst klein ausfällt. Um diesen Punkt klar zu machen, wollen wir ein Beispiel wählen. Es seien an eine Beleuchtungscentrale mit Wechselstrom 100 000 Glühlampen von 50 Watt angeschlossen und zwar mittels Transformatoren für jeden Abnehmer. Es sind also Transformatoren mit einer Gesamtleistung von 5000 Kwt. erforderlich, denn es kann ja der Fall eintreten, daß dieser oder jener Abnehmer gelegentlich alle seine Lampen gleichzeitig benützt. Die Maschinenanlage braucht jedoch nicht für 5000 Kwt. bemessen zu sein; denn erfahrungsgemäß werden selbst zur Zeit des stärksten Bedarfes nie alle angeschlossenen Lampen gleichzeitig benützt, sondern nur ein Teil, der je nach dem Charakter des Beleuchtungsbezirkes zwischen 30 und 70 % schwankt. Nehmen wir 60 % als einen reichlich bemessenen Mittelwert an, so erhalten wir die Maximalleistung der Centrale als 3000 Kwt. an den Lampen. Die Tagesbelastung ist natürlich außerordentlich gering und schwankt zwischen 3 % und 4 %. Nehmen wir 3,5 % als Mittelwert, so würde die Leistung an den Lampen tagsüber etwas über 100 Kwt. betragen. Dazu muß noch der in den Transformatoren verlorene Hysteresiseffekt gezählt werden, welcher etwa 2 % durchschnittlich betragen mag. Es wäre also zur Deckung des Tagesbedarfes eine Wechselstrommaschine von etwa 200 Kwt. Leistung ausreichend. In Wirklichkeit wird jedoch mehr Strom verbraucht, als dieser Leistung entspricht, und der Unterschied wird umso größer, je größer der von den Transformatoren erheischte Leerlaufstrom ist. Bei 10 % Leerlaufstrom würde der Stromverbrauch zur Magnetisierung allein schon einer Leistung von 500 Kwt. entsprechen; bei 5 % Leerlaufstrom einer solchen von 250 Kwt. Damit man nun tagsüber nicht eine zu große Maschine im Betrieb erhalten muß und damit nicht unnützerweise Stromwärme in den Leitungen verloren geht, ist es sehr wichtig, den Leerlaufstrom der Transformatoren so gering als möglich zu machen.

Der Leerlaufstrom ist jener Strom, welcher zur Magnetisierung des Eisenkernes bis auf den der Spannung entsprechenden Wert von $\mathfrak{B}$ und zur Deckung des Hysteresisverlustes nötig ist. Wir können diesen Magnetisierungsstrom nach den bekannten Gesetzen der Elektromagnete berechnen, wenn die Dimensionen des Eisenkernes, die Qualität des Eisens und die Windungszahl der Primärspule bekannt sind.

Sei l in Fig. 39 die aus der Zeichnung gemessene mittlere Länge des Kraftlinienpfades und μ die Permeabilität des Eisens, so ist bei n Windungen die durch den Strom I_μ erzeugte magnetisierende

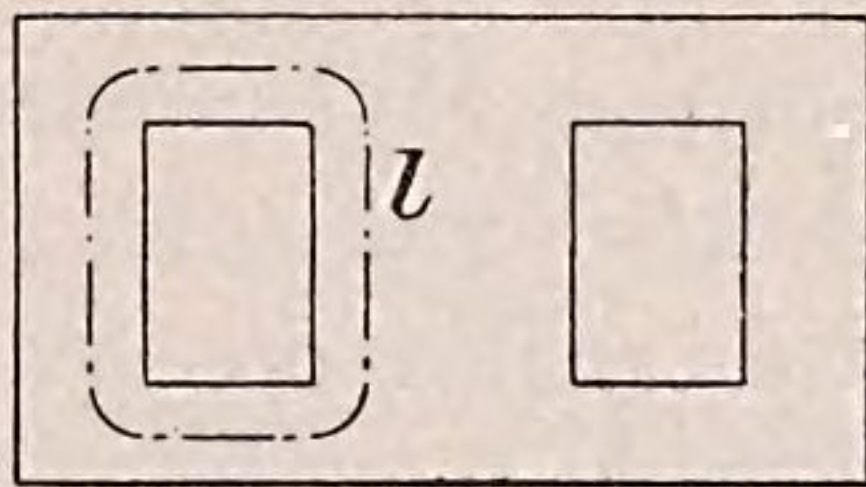


Fig. 39.

Kraft $4\pi n I_\mu : l$, wenn I_μ in absolutem Maß gegeben ist. Setzt man I_μ in Ampère ein, so ist die magnetisierende Kraft $0,4\pi n I_\mu : l$. Die dadurch erzeugte Induktion ist:

$$\mathfrak{B} = \mu \frac{0,4\pi n I_\mu}{l}.$$

Dabei ist I_μ natürlich der Maximalwert des Wechselstromes. Will man seinen effektiven Wert i_μ einsetzen, so ist (weil $I_\mu = i_\mu \sqrt{2}$):

$$\mathfrak{B} = \mu \frac{0,4\pi \sqrt{2} n i_\mu}{l}$$

$$\mathfrak{B} = \mu \frac{1,78 n i_\mu}{l},$$

woraus

$$i_\mu = \frac{\mathfrak{B} l}{\mu n 1,78}.$$

Die Änderung im magnetischen Fluß induziert in den Windungen der Spule eine elektromotorische Kraft, deren Phase jedoch gegenüber jener des Magnetisierungsstromes um genau 90° verschoben ist, wie sich sofort aus folgender Überlegung ergibt. Wenn der Strom sein Maximum erreicht, ist $\mathfrak{B}$ auch ein Maximum, die EMK also Null. Wenn der Strom durch Null geht, erreicht die EMK ihren Maximalwert.

Dem Maximum des Stromes entspricht also die EMK Null und dem Maximum der EMK entspricht die Stromstärke Null. Diese Beziehung kann nur eintreten, wenn der Winkel φ in Fig. 31 90° beträgt; dann ist aber $e i \cos \varphi = 0$.

Der eigentliche Magnetisierungsstrom verbraucht mithin keine Energie; sein Vektor steht im Polardiagramm Fig. 33 auf dem Vektor der EMK senkrecht und ist in dieser Figur mit i_μ bezeichnet.

Nun wird aber infolge der Hysteresis Arbeit verbraucht, und der dazugehörige Strom muß demnach der Phase nach mit der EMK zusammenfallen. Es ist das der Strom i_h in Fig. 33.

Der gesamte Leerlaufstrom ist also die Resultierende aus den zwei Komponenten:

Dem wattlosen Magnetisierungsstrom i_μ ;

Dem zur Deckung der Hysteresis gebrauchten Strom i_h .

Da diese beiden Komponenten, wie eben gezeigt wurde, aufeinander senkrecht stehen, so ist der Leerlaufstrom i_o gegeben durch die Gleichung

$$i_o = \sqrt{i_\mu^2 + i_h^2}.$$

Bei Ableitung des Ausdruckes für den Magnetisierungsstrom haben wir angenommen, daß die magnetisierende Kraft einzig und allein dazu dient, den magnetischen Fluß durch das Eisen zu treiben, mit anderen Worten, wir haben angenommen, daß der Pfad für die Kraftlinien nicht durch Luft oder andere Zwischenräume unterbrochen ist, daß der Eisenkörper des Transformators also keine Quersfugen hat. Nun ist aber schon hervorgehoben worden, daß in manchen Typen der Eisenkörper nicht aus einem stoßfreien Stück mit überlappenden Blechen besteht, sondern behufs bequemer Montage aus einzelnen Teilen mit ebenen Stoßflächen zusammengesetzt wird. An diesen Stoßflächen kann aber die Berührung aus den in Kapitel III angegebenen Gründen keine vollkommene sein und es wird dadurch dem Flusse der Kraftlinien ein gewisser Widerstand geboten. Die Berührungsflächen müssen, wie schon gezeigt wurde, durch eine dünne Schicht von Isoliermaterial getrennt sein. Wenn δ die gesamte Dicke dieser Schichten ist (also $\frac{\delta}{2}$ oder $\frac{\delta}{4}$ die Dicke einer Einlage bei 2 bzw. 4 den Weg der Kraftlinien unterbrechenden Stoßflächen) und $\mathfrak{B}$ die an diesen Flächen herrschende Induktion bedeutet, so ist, weil für Luft- und Isoliermaterial $\mu = 1$, die zur Überwindung der magnetischen Luftwiderstände nötige magnetisierende Kraft

$$0,4 \pi n I : \delta$$

und die aufgewendeten effektiven Ampèrewindungen sind

$$ni = \frac{\mathfrak{B} \delta}{1,78}.$$

Der Magnetisierungsstrom ist also durch die Formel gegeben

$$i_{\mu} = \frac{\mathfrak{B}}{1,78n} \left(\frac{l}{\mu} + \delta \right),$$

wobei l und δ in Centimetern einzusetzen sind. Dabei ist angenommen, daß die Stofsfläche gleich dem Querschnitt des Kernes ist. Wenn der Transformator einen kontinuierlichen Kern (also ohne Stofsflächen) hat, so ist $\delta = 0$ und die Formel ist

$$i_{\mu} = \frac{\mathfrak{B} l}{1,78n\mu},$$

wie schon oben angegeben.

Wenn wir uns zunächst auf Transformatoren beschränken, welche keine Stofsugen haben, wo also δ thatsächlich Null ist, so können wir diese Formel benützen, um μ als Funktion der Induktion $\mathfrak{B}$ zu berechnen und zwar aus Versuchen mit fertigen Transformatoren. Man läßt den Transformator bei offenem sekundären Stromkreis arbeiten und bestimmt die Stromstärke bei Leerlauf und den gesamten Wattverlust, während gleichzeitig die Primärspannung und Periodenzahl beobachtet wird. Aus diesen Beobachtungen bestimmt man mit Zuhilfenahme der als bekannt vorausgesetzten Konstruktionsdaten die Induktion $\mathfrak{B}$ und diejenige Komponente des Stromes, welche zur Deckung der Verluste nötig ist. Ist P_v der Effektverlust bei Leerlauf, den wir mittels des Wattmeters bestimmen, und e die Spannung, so ist

$$i_h = P_v : e.$$

Bei guten und selbst schon bei mittelguten Transformatoren ist die Leerlaufstromstärke so klein, daß die dadurch erzeugte Stromwärme in den Windungen der Spule vernachlässigt werden kann. Der Verlust P_v ist also lediglich durch Hysteresis und allenfalls durch Wirbelströme verursacht. Es sei i_o der gemessene Leerlaufstrom. Den Magnetisierungsstrom bestimmt man dann aus

$$i_{\mu} = \sqrt{i_o^2 - i_h^2}$$

und findet daraus

$$\mu = \frac{\mathfrak{B} l}{1,78 n i_{\mu}}.$$

Wenn man den Versuch bei verschiedener Primärspannung macht, so kann man auf diese Weise eine Reihe von zusammengehörigen Werten von μ und $\mathfrak{B}$ finden und diese dann zur Bestimmung des Leerlaufstromes neu zu konstruierender Transformatoren benützen.

Die folgende Tabelle enthält eine Reihe von zusammengehörigen Werten von μ und $\mathfrak{B}$, welche auf die hier angegebene Weise gefunden wurden. Das in den Versuchstransformatoren verwendete Eisen war verschieden, lag aber in Bezug auf Hysteresisverlust innerhalb der in Fig. 9 durch die beiden Kurven angegebenen Grenzen. Es stellte sich bei den Versuchen übrigens heraus, daß die Permeabilität kein Maß für die Güte des Eisens ist und daß der Unterschied der Permeabilität bei den verschiedenen Eisensorten nicht bedeutend ist. Die folgende Tabelle enthält Mittelwerte.

$\mathfrak{B} =$	2000	3000	4000	5000	6000	7000
$\mu =$	1300	1720	2070	2330	2570	2780

Die aus diesen Werten konstruierte Kurve ist in Fig. 9 mit aufgenommen.

Einfluss der Stoßfugen. Es erübrigt noch zu untersuchen, welchen Einfluss Stoßfugen auf den Leerlaufstrom haben. Auf seine Wattkomponente haben sie natürlich keinen Einfluss, denn diese hängt nur von den Verlusten, nicht aber von dem magnetischen Widerstand ab. Die wattlose Komponente wird jedoch durch den magnetischen Widerstand der Fugen sehr bedeutend beeinflusst. Das erhellt sofort aus der Anwendung der Formel

$$i_{\mu} = \frac{\mathfrak{B}}{1,78 n} \left(\frac{l}{\mu} + \delta \right)$$

auf einige praktische Beispiele. In Kerntransformatoren der Type Fig. 15 oder Fig. 16 würden bei Zusammensetzung des Eisenkörpers aus einzelnen Stücken vier Stoßfugen entstehen. Der Zwischenraum zwischen den Blechkanten in jeder Fuge kann selbst bei der sorgfältigsten Bearbeitung und Anwendung der dünnsten Isolierschichten, welche noch genug mechanische Festigkeit bieten, nicht wohl kleiner als $\frac{1}{2}$ mm gemacht werden. Es ist also im Mittel $\delta = 0,2$. Die Permeabilität ist, wie man aus der Kurve Fig. 9 sieht, von der Größenordnung 2000. Die Länge l des magnetischen

Pfades richtet sich nach der Gröfse des Transformators. Bei kleinen Transformatoren von 1 bis 10 Kwt. schwankt sie zwischen den Grenzen 70 bis 160 cm und bei grofsen Transformatoren von etwa 100 Kwt. ist sie ungefähr 300 cm. Nehmen wir als Mittelwert bei kleinen Transformatoren 100 und bei grofsen 250 cm an, so finden wir, dafs der Bruch $\frac{l}{\mu}$ zwischen den Grenzen 0,05 und 0,15 liegt. Der Ausdruck in der Klammer wird also durch die Stofsfugen bei kleinen Transformatoren von 0,05 auf 0,25 und bei grofsen von 0,15 auf 0,35 erhöht. Das ist eine Vergröfserung um 400 bzw. 133 %. Der Einfluss dieser Vergröfserung mag an einem praktischen Beispiel erläutert werden.

Es sei bei einem kleinen Transformator ohne Stofsfugen der Magnetisierungsstrom $i_{\mu} = 4\%$ und der zur Deckung des Hysteresisverlustes nötige Strom $i_h = 3\%$ des vollen Betriebsstromes. Dann ist der Leerlaufstrom $i_o = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5\%$ des vollen Betriebsstromes. Jetzt bauen wir genau denselben Transformator, aber mit vier Stofsfugen. Dadurch wird i_h nicht geändert; i_{μ} ist jedoch jetzt auf 20 % angewachsen und der Leerlaufstrom ist jetzt $\sqrt{3^2 + 20^2} = 20,2\%$. In einem grofsen Transformator ohne Stofsfugen sei $i_h = 1,5\%$ und $i_{\mu} = 2\%$. Dann ist $i_o = \sqrt{1,5^2 + 2^2} = 2,5\%$. Wird nun der gleiche Transformator mit Stofsfugen gebaut, so ist $i_{\mu} = 4,6\%$ und $i_o = \sqrt{1,5^2 + 4,6^2} = 4,85\%$. Durch die Anwendung von Stofsfugen ist also der Leerlaufstrom beim kleinen Transformator auf das Vierfache und beim grofsen auf nahezu das Doppelte gestiegen.

Bei Manteltransformatoren liegen die Verhältnisse noch ungünstiger, weil die Länge des magnetischen Pfades l hier nur etwa ein Drittel der entsprechenden Gröfse in Kerntransformatoren beträgt und der schädliche Einfluss der Stofsfugen daher um so fühlbarer wird. Es werden deshalb Manteltransformatoren nie mit Stofsfugen gebaut, sondern die Bleche nach einer der in Kapitel III erläuterten Anordnungen einzeln in die Spulen eingesetzt. Bei grofsen Kerntransformatoren sind Stofsfugen allenfalls noch zulässig, besonders wenn der Transformator meistens unter Belastung arbeitet, weil dann der gröfsere oder kleinere Magnetisierungsstrom gegenüber dem nützlichen oder Arbeitsstrom aufser Betracht fällt. Für kleine Einzeltransformatoren, die an ein städtisches Verteilungs-

netz angeschlossen werden, sind jedoch Stosfugen unter allen Umständen zu vermeiden.

Fünftes Kapitel.

Konstruktion eines Transformators. — Günstigste Verteilung des Kupfergewichtes. — Kosten des aktiven Materiales. — Günstigste Verteilung der Verluste. — Wirtschaftlicher Betrieb. — Konstruktionsdetails.

Konstruktion eines Transformators. Um die praktische Anwendung der bisher gegebenen Formeln und Regeln zu zeigen, soll nun ein Transformator durchkonstruiert werden. Wir wählen zunächst die Kerntype und nehmen die Kerndicke zu 125 mm an. Die Abmessungen des Wicklungsraumes sind dann $a = 160$; $b = 450$ mm. Der Transformator möge für $\sim = 50$ bestimmt sein und wir wählen zunächst für die Induktion $\mathfrak{B} = 5000$. Die Bleche werden durch isolierte Bolzen an den Ecken zusammengehalten und die Spulen werden auf Papiercylinder, die entsprechende Flanschen haben, gewickelt und einzeln aufgeschoben. Dabei ist es gleichgültig, ob die Hochspannungs- oder die Niederspannungs-Spule außen zu liegen kommt. Wir wählen die erstere Anordnung.

Um etwas an Draht zu sparen, wollen wir die Ecken des Kernes um 20 mm abschrägen, was dadurch geschieht, daß man beim Zusammenstellen der Kernbleche die nach außen zu liegen kommenden Bleche stufenweise schmaler nimmt. Der Kern wird dann durch Umwicklung mit starkem Baumwollen- oder Hanf-Band zusammengehalten. Die Dicke dieser Bewicklung beträgt ungefähr 2 mm. Wenn man noch an den Ecken einen Spielraum von 2 mm behufs bequemer Aufschiebung der Spule läßt, so findet man aus der Zeichnung (Fig. 40), daß der innere Durchmesser des ersten Papiercylinders 160 mm beträgt. Seine Dicke kann zu 5 mm angenommen werden, so daß der innere Durchmesser der Sekundärspule 170 mm beträgt. Die Tiefe der Windungen und somit die mittlere Windungslänge können vorläufig nur annähernd geschätzt werden. Anhaltspunkte zu dieser Schätzung sind folgende: Aus den Dimensionen des Eisenkörpers ersieht man, daß der Abstand zwischen den Mittelpunkten der Spulen auf beiden Schenkeln $125 + 160 = 285$ mm ist. Der äußere Durchmesser der Primärspulen könnte also höchstens 285 mm

betragen; da aber dabei schon Berührung der beiden Spulen eintreten würde, so müssen wir den Durchmesser kleiner wählen. Ein gewisser Spielraum zwischen den beiden Spulen muß erlaubt werden, erstens wegen etwaiger Unregelmäßigkeiten in der Herstellung, und zweitens um der Luft oder dem Öl Zugang zu verschaffen. Nehmen wir nun einen Spielraum von 20 mm an, so würde der äußere Durchmesser der Primärspulen 265 mm betragen. Wir haben also zwischen der inneren Fläche der Sekundärspule und der äußeren Fläche der Primärspule einen Raum

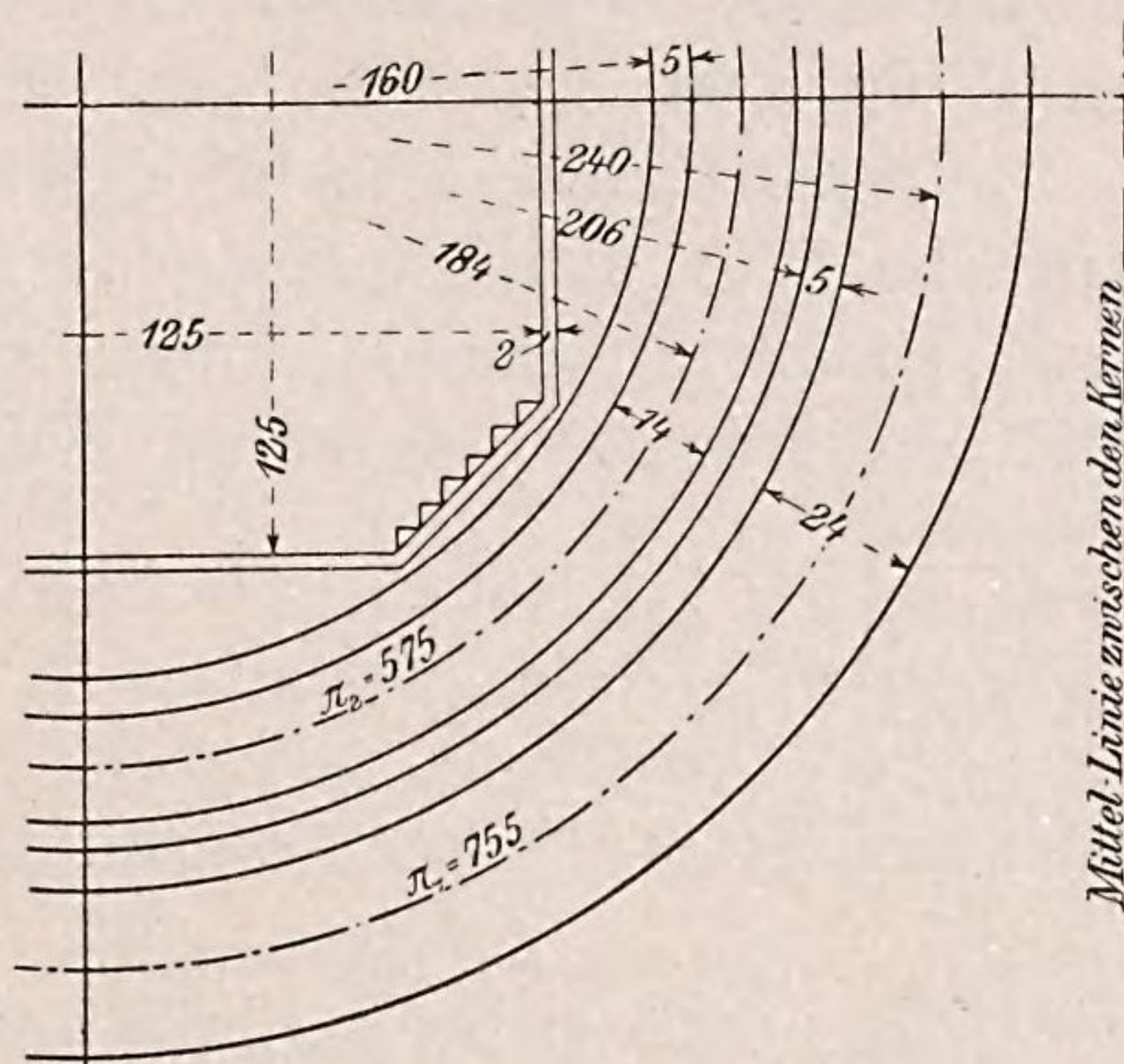


Fig. 40.

von $\frac{1}{2} (265 - 170) = 47,5$ mm. Dieser Raum setzt sich zusammen aus folgenden Größen: Tiefe der sekundären Wicklung, dem Spielraum zwischen letzterer und der Innenseite des primären Papier-Cylinders, der Dicke des Cylinders und der Tiefe der Primärwicklung. Für Spielraum rechnen wir 4 mm und für die Dicke des primären Papier-Cylinders 5 mm. Es bleiben also $47,5 - 9 = 38,5$ mm auf die Wicklungstiefe der beiden Spulen zu verteilen. Dabei ist zu beachten, daß die Tiefe der primären Wicklung mehr als die Hälfte ausmachen wird, denn erstens ist wegen des dünneren Drahtes die Raumausnützung nicht so gut, und zweitens hat diese Spule den größeren Durchmesser, dessen Einfluß auf den ohmschen Widerstand durch einen größeren Drahtquerschnitt ausgeglichen werden muß. Als ersten Versuch für die Verteilung des Raumes kann man 60 % des Gesamtraumes der Primärspule und 40 % der Sekundärspule zuschreiben.

Günstigste Verteilung des Kupfergewichtes. Der Grund, warum eine richtige Verteilung des vorhandenen Wicklungsraumes zwischen den beiden Spulen wichtig ist, liegt darin, daß die gesamte Stromwärme ein Minimum wird, wenn sie zwischen den beiden Spulen gleich verteilt ist. Dieses läßt sich leicht folgendermaßen zeigen. Nennen wir die verfügbare Wicklungstiefe b (in unserem Falle ist $b = 38,5$ mm) und die Tiefe der Sekundärwicklung a , so ist die Tiefe der Primärwicklung $b - a$. Der innere Durchmesser der Sekundärspule sei D . Dann ist ihr ohmscher Widerstand proportional der Windungszahl n_2 und der mittleren Windungslänge $\pi (D + a)$. Er ist umgekehrt proportional dem Drahtquerschnitt, also bei gegebener Länge der Spule ist der ohmsche Widerstand umgekehrt proportional der Wicklungstiefe a . Unter Zusammenfassung aller konstanten Größen in einen Koeffizienten k können wir also schreiben

$$P_{v_2} = k n_2 \frac{D + a}{a} i_2^2,$$

wobei P_{v_2} den Effektverlust durch Stromwärme in der Sekundärspule bezeichnet.

Für die Primärspule ergibt sich ein ähnlicher Ausdruck, nur müssen wir den Koeffizienten k noch mit dem Verhältnis der Windungszahlen multiplizieren, damit der gleiche Ausdruck auch für den dünneren Draht gilt. Das gibt

$$P_{v_1} = k n_1 \frac{D + a + b}{b - a} \cdot \frac{n_1}{n_2} i_1^2.$$

Da nun $n_1^2 i_1^2 = n_2^2 i_2^2$, so kann man auch schreiben

$$P_{v_1} = k n_2 \frac{D + a + b}{b - a} \cdot i_2^2$$

und der gesammte Verlust durch Stromwärme ist

$$P_v = k n_2 i_2^2 \left(\frac{D + a}{a} + \frac{D + a + b}{b - a} \right).$$

Damit dieser Verlust ein Minimum werde, muß a so gewählt werden, daß der eingeklammerte Ausdruck ein Minimum wird.

Wenn wir den ersten Differentialquotienten bilden und gleich 0 setzen, so erhalten wir nach einigen Kürzungen

$$a^2 + aD - \frac{bD}{2} = 0,$$

woraus

$$a = -\frac{D}{2} + \sqrt{\frac{D^2}{4} + \frac{bD}{2}}.$$

Wenn man die beiden Brüche innerhalb der Klammern gleichsetzt, so erhält man ebenfalls den Ausdruck

$$a^2 + aD - \frac{bD}{2} = 0,$$

welcher der Bedingung für Minimalstromwärme entspricht.

Es ist dadurch bewiesen, daß die günstigste Konstruktion jene ist, bei welcher die durch Stromwärme erzeugten Verluste in beiden Spulen gleich sind. Wenn also unsere erste Annahme in Bezug auf die Wickelungstiefen diese Gleichheit nicht erzielt, so muß die Verteilung des verfügbaren Wickelungsraumes zwischen beide Spulen entsprechend geändert werden.

Wir berechnen also zunächst für die angenommene Induktion $\mathfrak{B} = 5000$ und Periodenzahl $\infty = 50$ die Windungszahlen und entwerfen die Wickelungen. Dabei finden wir, daß in der Primärspule zu viel und in der Sekundärspule zu wenig Stromwärme entwickelt wird. Um das Mißverhältnis auszugleichen, müssen wir die Tiefe der Wickelung in der Sekundärspule etwas verkleinern und in der Primärspule entsprechend vergrößern. Es ist nicht notwendig, diese vorläufigen Berechnungen hier durchzuführen; das Resultat ist folgendes:

Günstigste Wickelungstiefe der Sekundärspule	14 mm
» » » Primärspule	24 »

Die Spulen können jetzt also aufgezeichnet und die mittlere Windungslänge in jeder kann aus der Zeichnung nunmehr genau ermittelt werden. Das gibt

$$\pi_2 = 0,575 \text{ m} \quad \pi_1 = 0,755 \text{ m}.$$

Wir berechnen nun zunächst den Hysteresisverlust und nehmen dabei an, daß das Eisen sehr gut sei, so daß die untere der beiden Kurven in Fig. 9 zu nehmen ist. Es entspricht einer

Induktion von 5000 nach dieser Kurve ein Verlust von 1,8 Watt pro Kilogramm per 100 Perioden in der Sekunde. Da unser Transformator jedoch nur mit 50 Perioden betrieben werden soll, so ist der Verlust nur halb so groß. Jedes Kilogramm des Kernes wird also 0,9 Watt gebrauchen. Der Querschnitt des Kernes ist mit Berücksichtigung der Abschrägungen 130 qcm; in den beiden Jochen, wo die Ecken nicht abgeschrägt sind, ist er 136 qcm. Die Induktionen sind also in Kern und Joch bzw. 5000 und 4770. Die Gewichte bestimmt man aus der Zeichnung und erhält:

2 Kerne . . .	116,8 kg,	$\mathfrak{B} = 5000$	bei 0,9 W.	Hysteresis	105 W.
2 Joche . . .	61,2 »	$\mathfrak{B} = 4770$	» 0,85 »	»	52 »
Gesamtgewicht 179,0 kg.					Gesamtverlust 157 W.

Die gesamte abkühlende Oberfläche wird jetzt aus der Zeichnung bestimmt.

Die Berechnung ergibt 12 000 qcm. Nehmen wir nun zunächst an, daß der Transformatorkasten nicht mit Öl gefüllt werden soll, und daß bei Dauerbetrieb mit voller Belastung die Temperaturerhöhung 54°C . nicht übersteigen soll. Wir haben dann aus der Temperaturkurve (Fig. 29) für Luft $\sigma = 37$ und die Belastung ist so zu wählen, daß der Gesamtverlust $12\,000 : 37 = 324$ Watt nicht übersteigt. Die Kupferwärme in allen Spulen ist also $324 - 157 = 167$ Watt, somit bei richtiger Verteilung zwischen beiden Wicklungen 83,5 Watt für jede Wicklung.

Wir haben nunmehr die Wicklung zu entwerfen. Dabei ist zu beachten, daß neben dem Spannungsverlust durch ohmschen Widerstand noch ein durch magnetische Streuung hervorgebrachter Spannungsverlust auftritt. Den letzteren kann man nicht berechnen, er läßt sich jedoch aus Versuchen mit ähnlichen Transformatoren annähernd schätzen. Bei der gewählten Konstruktion, wo die Spulen nicht nebeneinander, sondern ineinander liegen, ist er sehr klein, und kann zu ungefähr 1% angenommen werden. Wenn wir nun den ohmschen Verlust in den Wicklungen zu $1\frac{1}{2}\%$ annehmen, so wird die sekundäre Klemmenspannung zwischen Leerlauf und Vollbelastung um $2\frac{1}{2}\%$ verschieden sein.

Da $N = 130 \times 5000 = 650\,000$ und $\infty = 50$, so erhalten wir aus der Formel

$$E_2 = 4,44 \infty n_2 N 10^{-8}$$

die Windungszahl n_2 . Diese muß offenbar eine ganze Zahl sein, und wenn wir die Anordnung der Wickelung auf beiden Schenkeln symmetrisch machen (was wegen Raumausnützung erwünscht ist), so muß n_2 auch eine gerade Zahl sein. Die nächste gerade Zahl, welche in die Formel paßt, ist

$$n_2 = 70,$$

wobei $E_2 = 101,23$ wird, wenn $\mathfrak{B} = 5000$ ist.

Wenn nun weder Spannungsabfall durch Streuung, noch durch ohmische Verluste eintreten würde (wie das bei Leerlauf der Fall ist), so wäre die Anzahl der Primärwindungen $2000:100 = 20$ mal so groß zu nehmen. Wir würden also $n_1 = 1400$ erhalten. Dann würde die Spannung an den Sekundärklemmen bei Leerlauf und bei 2000 Volt Primärspannung genau 100 Volt betragen, jedoch bei Vollbelastung um $2\frac{1}{2}\%$ abnehmen, also nur 97,5 Volt betragen. Will man nun bei Vollbelastung die volle Spannung von 100 Volt an den Sekundärklemmen erhalten, so muß das Übersetzungsverhältnis um $2\frac{1}{2}\%$ vermindert werden. Die Windungszahl in der Primärwicklung muß also um $2\frac{1}{2}\%$, das ist um 35 Windungen kleiner gemacht werden. Wir erhalten somit

$$n_1 = 1365.$$

Es ist dann bei Leerlauf E_2 nicht 101,23, sondern 102,5 Volt und die Induktion ist im gleichen Verhältnisse, d. h. um $102,5 - 101,23 = 1,27\%$ gestiegen. Sie beträgt also jetzt nicht 5000, sondern 5063. Wenn man diese Korrektur an dem früher bestimmten Hysteresisverlust macht, so findet man, daß derselbe nunmehr nicht 157, sondern 161 Watt beträgt.

Wir können jetzt mit Hilfe der Zeichnung jene Drahtstärken bestimmen, welche in den verfügbaren Wickelungsräumen untergebracht werden können. Für die Länge der Spulen ist die Höhe des Fensters maßgebend (in unserem Falle 45 cm), wobei noch der Raum für die Flanschen und ein gewisser Spielraum abziehen ist. Man kann für diese Zwecke etwa $3\frac{1}{2}$ cm in Abzug bringen, so daß die Spulen selbst eine wirkliche Länge von 41,5 cm haben. Jede Sekundärspule muß 35 Windungen erhalten. Wenn man diese in einer einzigen Lage anbringen wollte, so würde der Draht hochkantig gewickelt werden müssen, was

gewisse Schwierigkeiten macht. Es ist also besser, die sekundäre Wicklung in zwei Lagen von zusammen 35 Windungen anzubringen; eine Lage mit 18 und die andere mit 17 Windungen. Da nun beim Übergang von der unteren auf die obere Lage der Raum einer Windung verloren geht, so muß die Breite des besponnenen Drahtes nicht $\frac{1}{18}$, sondern $\frac{1}{19}$ der Spulenlänge sein, also $41,5 : 19 = 21,8$ mm betragen. Die Dicke des Drahtes ist durch die Wicklungstiefe von 14 mm schon festgesetzt. Rechnet man 0,5 mm Bespinnung (also einen Zuschlag von 1 mm per Draht), so findet man, daß der nackte Draht 6 mm tief und 20,8 mm breit sein kann. Da es jedoch nicht möglich ist, die einzelnen Windungen mit mathematischer Genauigkeit neben einander zu legen, so wollen wir die Breite zu 20 mm annehmen. Wir haben somit in den Sekundärspulen rechteckigen Draht von 6×20 mm = 120 qmm Querschnitt und einer Länge von $70 \times 0,575 = 40,5$ m, oder mit Zuschlag von 0,5 m für die Verbindungen rund 41 m. Der Widerstand berechnet sich unter Berücksichtigung der Temperaturerhöhung aus

$$W_2 = \frac{0,02 l_2}{120} = 0,00682 \text{ Ohm.}$$

Eine ähnliche Rechnung für die Primärspulen ausgeführt, zeigt, daß runder Draht von 3,1 mm Durchmesser (besponnen auf 3,67 mm) verwendet werden muß. Es kommen 112 Windungen auf eine Lage und es sind im Ganzen auf jedem Schenkel 6 Lagen und 10 bzw. 11 Windungen erforderlich. Die Windungslänge ist 1030 m und der Widerstand warm ist

$$W_1 = 2,8 \text{ Ohm.}$$

Wir können jetzt den Gesamtverlust bei verschiedenen Belastungen bestimmen, wobei durchweg für $\mathfrak{B} = 5063$ der Hysteresisverlust mit 161 Watt in Rechnung zu setzen ist. Die folgende Tabelle enthält das Ergebnis.

Belastung in Kilowatt .	8	9	10	11	12	13	14	15
Sekundärstrom Ampère	80	90	100	110	120	130	140	150
Primärstrom Ampère .	4,125	4,634	5,15	5,664	6,18	6,7	7,22	7,44
Stromwärme	91	115	143	172	205	241	278	321
Hysteresis	161	161	161	161	161	161	161	161
Gesamtverlust . . .	252	276	304	333	366	402	439	482

Prozentualer Verlust	3,05	3,06	3,04	3,03	3,06	3,09	3,15	3,22
Abkühlungsfläche	47,6	43,5	39,5	36,0	32,8	30,0	27,4	25,0
Temperaturerhöhung in Luft	45,5	48,5	51,3	54,0	57,2	60,6	64	67
Temperaturerhöhung in Öl	34	36,0	38,5	40,6	43	45	47	49,3

Wenn also der Transformator, wie eben angenommen, nicht mit Ölfüllung versehen werden soll, so wird man ihn höchstens bis auf 11 Kwt. belasten dürfen. Der Gesamtverlust beträgt dabei 333 W. Es müssen also 11333 W. zugeführt werden und der Wirkungsgrad ist

$$\eta = \frac{11\,000}{11\,333} = 97\%.$$

Bei Ölfüllung kann man bis auf 15 Kwt. belasten und erhält ungefähr den gleichen Wirkungsgrad.

Kosten des aktiven Materiales. Der Wirkungsgrad allein reicht jedoch nicht aus, um die Güte der Konstruktion zu beurteilen. Wir müssen auch das Gewicht und die Kosten mit in Betracht ziehen und zwar bezogen auf das Kilowatt Leistung. Wenn man das Kilogramm gestanztes oder zugeschnittenes Blech zu 75 Pf. und das Kilogramm besponnenen Kupferdraht zu M. 1,75 in Rechnung setzt, so erhält man für die Kosten:

Eisen	179,0 kg	à	0,75		M. 134
Kupfer	111,5 »	»	1,75		» 195
Gesamtgewicht	290,5 kg.			Gesamtkosten	M. 329.

Das Gesamtgewicht und die Gesamtkosten beziehen sich nur auf das aktive Material, d. h. Eisenblech und Kupferdraht.

	Luftkühlung	Ölkühlung
Leistung Kilowatt	11	15
Gewicht des aktiven Materiales pro Kilowatt	26,4 kg	19,4 kg
Kosten des aktiven Materiales pro Kilowatt	M. 29,9	M. 21,9

Günstigste Verteilung der Verluste. Der mit Ölkühlung arbeitende Transformator stellt sich also leichter und billiger im Verhältnis zu seiner Leistung als der mit Luftkühlung

arbeitende. Allerdings ist bei ersterem der prozentuale Verlust etwas größer, nämlich 3,22 % der Leistung gegen 3,03 % bei Luftkühlung. Bei einer Belastung von 11 Kwt. ist also der Wirkungsgrad ein Maximum. Dabei ist der durch Stromwärme erzeugte Verlust von dem Hysteresisverlust nicht sehr verschieden. Bei einer kleineren Leistung verschlechtert sich der Wirkungsgrad und der Hysteresisverlust überwiegt; bei einer größeren Leistung verschlechtert sich der Wirkungsgrad ebenfalls, aber dann überwiegt der Stromwärmeverlust. Es liegt also der Gedanke nahe, daß das Maximum des Wirkungsgrades bei jener Konstruktion erhalten wird, bei welcher der Hysteresisverlust ungefähr gleich ist dem Stromwärmeverlust, und wenn diese Voraussetzung zutrifft, müßte sich der Wirkungsgrad des 15 Kwt.-Transformators dadurch verbessern lassen, daß man das Eisen mehr und das Kupfer weniger beansprucht. Der Gesamtverlust ist bei 15 Kwt. nach obiger Tabelle 482 Watt. Wir wollen nun die Wickelung so ändern, daß der Hysteresisverlust etwa die Hälfte des Gesamtverlustes ausmacht, also ungefähr 241 Watt beträgt. Der Verlust pro Kilogramm Eisen darf also jetzt bei 50 Perioden 1,34 Watt betragen, oder 2,68 Watt bei 100 Perioden. Das gibt aus der Kurve (Fig. 9) $\mathfrak{B} = 6300$.

Bei dieser Induktion würde $n_2 = 56,5$ sein; da wir aber keine halbe Windung haben können und wegen Symmetrie eine gerade Windungszahl einführen müssen, so wählen wir $n_2 = 56$. Dabei ist $N = 824000$ und $\mathfrak{B} = 6350$.

Der Hysteresisverlust berechnet sich jetzt genauer wie folgt:

2 Kerne	116,8 kg	$\mathfrak{B} = 6350$	bei	1,35 W.	.	.	158 W.
2 Joche	61,2 »	$\mathfrak{B} = 6080$	»	1,25 »	.	.	77 »
							235 W.

Der sekundäre Draht kann jetzt 26×6 mm gemacht werden und die Sekundärwicklung erhält einen Widerstand von $w_2 = 0,00415$ Ohm, wenn warm. Die Anzahl der Primärwindungen ist $20 \times n_2$ weniger $2\frac{1}{2}\%$ oder 1092 Windungen. Bei 3,5 mm Draht (besponnen auf 4,2 mm) kommen auf jede Lage 98 Windungen und sind pro Schenkel 5 Lagen und 54 Windungen erforderlich. Der Widerstand ist $w_1 = 1,72$ Ohm, wenn warm. Das Kupfergewicht ist sekundär 44,5 kg, primär 70,5 kg, also zusammen 115 kg.

Die folgende Tabelle gibt die Betriebsverhältnisse des Transformators.

Belastung in Kilowatt	8	12	15	16	17
Sekundärstrom	80	120	150	160	170
Primärstrom	4,15	6,18	7,72	8,23	8,75
Stromwärme Watt	56	115	195	222	252
Hysteresisverlust Watt	235	235	235	235	235
Gesamtverlust Watt	291	350	430	457	487
Prozentualer Verlust	3,64	2,92	2,87	2,86	2,86

Aus dieser Tabelle ergibt sich wieder, daß der kleinste prozentuale Verlust und mithin der beste Wirkungsgrad mit jener Belastung übereinstimmt, bei welcher die Stromwärme ungefähr die Hälfte des Gesamtverlustes ausmacht. Das Gewicht des aktiven Materiales in diesem Transformator ist 294 kg und die Kosten sind M. 335; da man ihn ganz gut bis auf 16 Kwt. belasten kann, so stellen sich Gewicht und Kosten auf 18,4 kg bzw. M. 20,9 pro Kwt. Wir haben also durch die höhere Beanspruchung des Eisens bei Ölkühlung eine bessere Konstruktion erzielt, indem sowohl die Kosten pro Kwt. als auch der prozentuale Verlust jetzt geringer ausfallen. Der Wirkungsgrad bei Vollbelastung ist in Folge dessen noch etwas besser geworden.

Wir können uns diesen Transformator bei $\mathfrak{B} = 6350$ in seinen linearen Dimensionen soweit reduziert denken, daß bei gleichem Wirkungsgrad die Leistung 15 anstatt 16 Kwt. wird. Es werden dann die linearen Dimensionen im Verhältnis $\sqrt[3]{\frac{15}{16}}$ zu reduzieren sein und die Verluste im Verhältnis von 15 : 16. Der Zweck dieser Reduktion ist, beide Transformatoren (nämlich jenen für $\mathfrak{B} = 5000$, den wir in der Folge mit I bezeichnen, und diesen für $\mathfrak{B} = 6350$, den wir mit II bezeichnen) auf dieselbe Gröfse zu bringen, damit sie unmittelbar vergleichbar werden.

Wir haben also bei Ölkühlung in beiden Fällen für den

Transformator	I	II
Induktion im Kern	5000	6350
Leistung Kilowatt	15	15
Temperaturerhöhung bei Vollbelastung	49,3°	49,0°
Hysteresisverlust Watt	161	220
Stromwärme Watt	321	208

Gesamtverlust Watt	482	428
Prozentualer Verlust %	3,22	2,85
Gewicht pro Kilowatt kg	19,4	18,4
Kosten pro Kilowatt M.	21,9	20,9

Wirtschaftlicher Betrieb. Aus dieser Zusammenstellung geht klar hervor, daß für den Fall, daß der Transformator dauernd unter Vollbelastung arbeiten soll, Konstruktion II in Bezug auf Anlagekosten und Wirkungsgrad der Konstruktion I vorzuziehen ist. Ein solcher Fall tritt ein bei Anlagen für elektrische Kraftübertragung und es wird sich daher im allgemeinen empfehlen, Transformatoren für Kraftlieferung so zu konstruieren, daß der Hysteresisverlust dem durch Stromwärme erzeugten Verlust annähernd gleich ist. Bei Transformatoren für Lichtlieferung verhält sich die Sache jedoch anders. Die mittlere Brennzeit aller installierten Lampen beträgt nur ungefähr 600 Stunden jährlich, wobei natürlich nicht immer alle Lampen gleichzeitig brennen. Der Transformator muß jedoch groß genug sein, um gelegentlich alle Lampen gleichzeitig speisen zu können. Er muß auch Tag und Nacht dauernd im Betriebe sein, damit man zu jeder Zeit Licht haben kann. Der Hysteresisverlust geht also dauernd fort, d. h. während 8760 Stunden im Jahre; der Stromwärmeverlust theoretisch genommen nur während 600 Stunden im Durchschnitt bei Maximalbelastung. In Wirklichkeit ist der Verlust jedoch geringer, weil die Maximalbelastung nicht 600 Stunden andauert, sondern eine viel kürzere Zeit, während eine kleinere und schwankende Belastung sich auf eine viel längere Zeit verteilt. Da nun der Verlust durch Stromwärme dem Quadrate der Belastung und der Zeit proportional ist, so wird er desto geringer, je kleiner die Belastung und je größer die Brenndauer ist.

Es möge dies an einem Beispiel erläutert werden. Es seien in einem Hause 100 Lampen installiert, und wenn alle Lampen gleichzeitig brennen, sei der Stromwärmeverlust im Transformator 100 Watt. Wenn nun alle Lampen immer gleichzeitig und zwar während 600 Stunden im Jahre brennen sollen, so würde der gesamte jährliche Verlust an Stromwärme 60 Kilowattstunden sein. Nun ist es jedoch ein seltener Ausnahmefall, daß man alle Lampen gleichzeitig braucht. Im allgemeinen wird man eine kleinere Lampenzahl während einer längeren Zeit als 600 Stunden

brauchen, wobei jedoch die gesamte Zahl der Lampenstunden die erfahrungsmäßige Ziffer von 60 000 erreicht. Nehmen wir zum Beispiel an, daß die Verteilung in der Weise stattfindet, wie es folgende Tabelle zeigt, so erhalten wir für die gesamten Wattstunden von Stromwärme nicht 60 000 wie oben, sondern nur 22 700. Die zwei letzten Spalten geben die jeder Belastung entsprechenden Verluste an Stromwärme in Watt bzw. Wattstunden.

Zahl der Lampen	Stunden	Lampenstunden	Watt	Wattstunden
100	50	5000	100	5000
70	100	7000	49	4900
40	500	20000	16	8000
20	1000	20000	4	4000
10	800	8000	1	800
	2450	60000		22700

Die mittlere Brennzeit aller installierten Lampen ist, wie oben angegeben, 600 Stunden, einzelne Lampen haben jedoch eine viel längere wirkliche Brennzeit. Dadurch wird die jährlich verlorene Stromwärme auf rund 38% von dem Werte reduziert, welchen man erhält, wenn man annimmt, daß alle Lampen immer gleichzeitig brennen. Wir können nun dieses Ergebnis zum Vergleich der beiden Konstruktionen I und II bei Lichtlieferung anwenden. Da 100 Watt Maximalstromwärme einen jährlichen Verlust von 22,7 Kwt.-Stunden verursachen, so stellt sich der jährliche Verlust bei I auf $22,7 \cdot \frac{321}{100} = 73$ Kilowattstunden und bei II auf $22,7 \cdot \frac{208}{100} = 47,3$ Kilowattstunden. Dazu müssen noch die Hysteresisverluste addiert werden. Bei 8760 Stunden jährlicher Betriebszeit verliert man durch Hysteresis in I 1410 Kilowattstunden und bei II 1930 Kilowattstunden.

Wir haben also bei Konstruktion	I	II
$\mathfrak{B} =$	5000	6350
Stromwärme Kilowattstunden jährlich	73	47,3
Hysteresis	1410	1930
Gesamtverluste	1483	1977
Gelieferte Arbeit	9000	9000
Jährlicher Wirkungsgrad	86%	82%

Unter jährlichem Wirkungsgrad versteht man' das Verhältnis der gesamten während eines Jahres dem Transformator zugeführten und entnommenen Arbeit.

Aus der obigen Tabelle geht hervor, daß Konstruktion I in Bezug auf den jährlichen Wirkungsgrad vorzuziehen ist. Allerdings ist diese Konstruktion ein wenig teurer. Es stellen sich dabei die Kosten für aktives Material auf M. 21,9 pro Kilowatt gegen M. 20,9 bei Konstruktion II. Zu den Kosten für aktives Material kommen noch die generellen Unkosten, Löhne und die Kosten für den Kasten, die Klemmschrauben und der Fabrikationsprofit. Erfahrungsgemäß stellt sich der Preis des fertigen Transformators auf das $2\frac{1}{2}$ bis 3fache der Kosten für das aktive Material. Nehmen wir das 2,75fache als Mittelwert, so würde der Preis betragen

bei Konstruktion I	M. 900
bei Konstruktion II	» 860

Es ist also I um M. 40 teurer als II. Dagegen ersparen wir dabei jährlich 494 Kilowattstunden. Rechnet man den Selbstkostenpreis der Kilowattstunde im Elektrizitätswerk zu 15 Pf., so würde die Ersparnis an Arbeit jährlich rund M. 74 betragen, also mehr als der Preisunterschied der beiden Transformatoren. Es ist mithin klar, daß auch in wirtschaftlicher Beziehung Konstruktion I entschieden den Vorzug verdient. Wir können jetzt die obigen Ergebnisse allgemein in folgende zwei Sätze zusammenfassen:

Der Transformator ist so zu konstruieren, daß
bei Kraftlieferung das Eisen stark und das Kupfer mäßig beansprucht wird. Stromwärme und Hysteresis sollen ungefähr gleich sein;

bei Lichtlieferung das Eisen schwach und das Kupfer stark beansprucht wird. Stromwärme soll größer sein als Hysteresis.

Natürlich muß im letzten Falle die Beanspruchung des Kupfers immerhin noch in den durch Erwärmung und Spannungsabfall gestellten Grenzen bleiben.

Konstruktion details. Die Figuren 41 bis 44 zeigen die Einzelheiten der Konstruktion des oben berechneten Transformators für 11 Kwt. bei Luftkühlung bzw. 15 Kwt. bei Ölkühlung.¹⁾

¹⁾ Die Zeichnung ist von Herrn Blau, einem Studierenden an der technischen Hochschule Charlottenburg, angefertigt worden.

Der Transformator ist in einen gußeisernen Kasten eingebaut und eignet sich daher zur Aufstellung in einem Keller oder anderen feuchten Ort, oder in freier Luft bei feuchtem Klima. Wo Feuchtigkeit in der Luft nicht zu befürchten ist, braucht der äußere Schutzmantel nicht hermetisch geschlossen zu sein, sondern muß nur so angeordnet werden, daß die Spulen nicht vom Regen naß werden können. Bei solchen Anlagen, wo Transformatoren

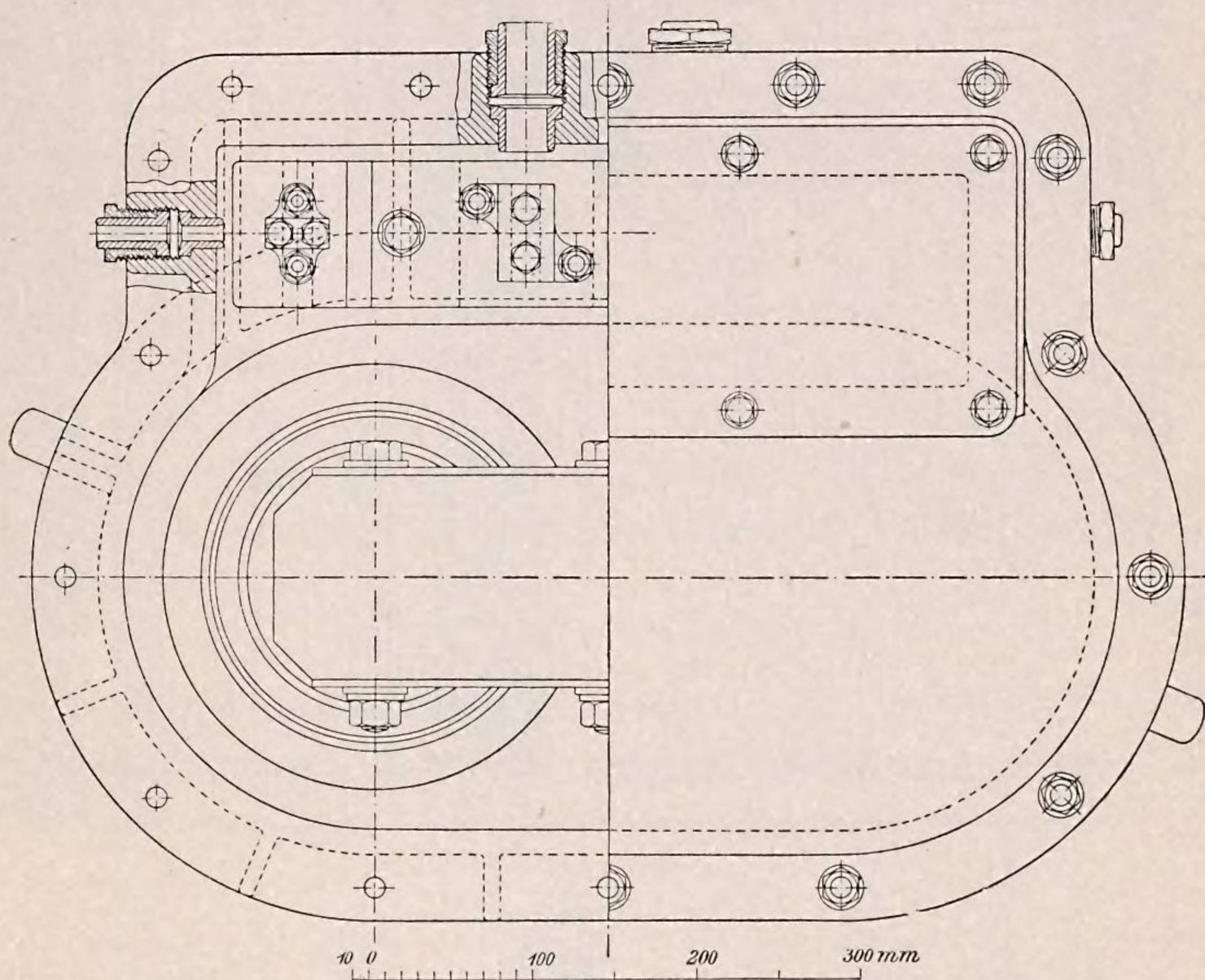


Fig. 41.

in trockenen Räumen aufgestellt werden, kann der äußere Schutzmantel auch aus perforiertem Blech bestehen und dann ist die Erwärmung geringer; sie kann etwa nach der unteren der beiden Kurven in Fig. 29 bemessen werden.

Nachdem die Bleche in der richtigen Gröfse zugeschnitten und ausgelocht sind, werden sie auf einer Seite mit sehr dünnem Papier belegt und zusammengesetzt, wobei die zwei Kerne und das untere Joch zuerst hergestellt werden. Die Spulen werden dann aufgeschoben und zuletzt werden die Bleche des oberen Joches eingesetzt. Die Spulen werden, wie schon erwähnt, auf Papiercylinder gewickelt. Am unteren Ende müssen die Papier-

Masstab 1:6

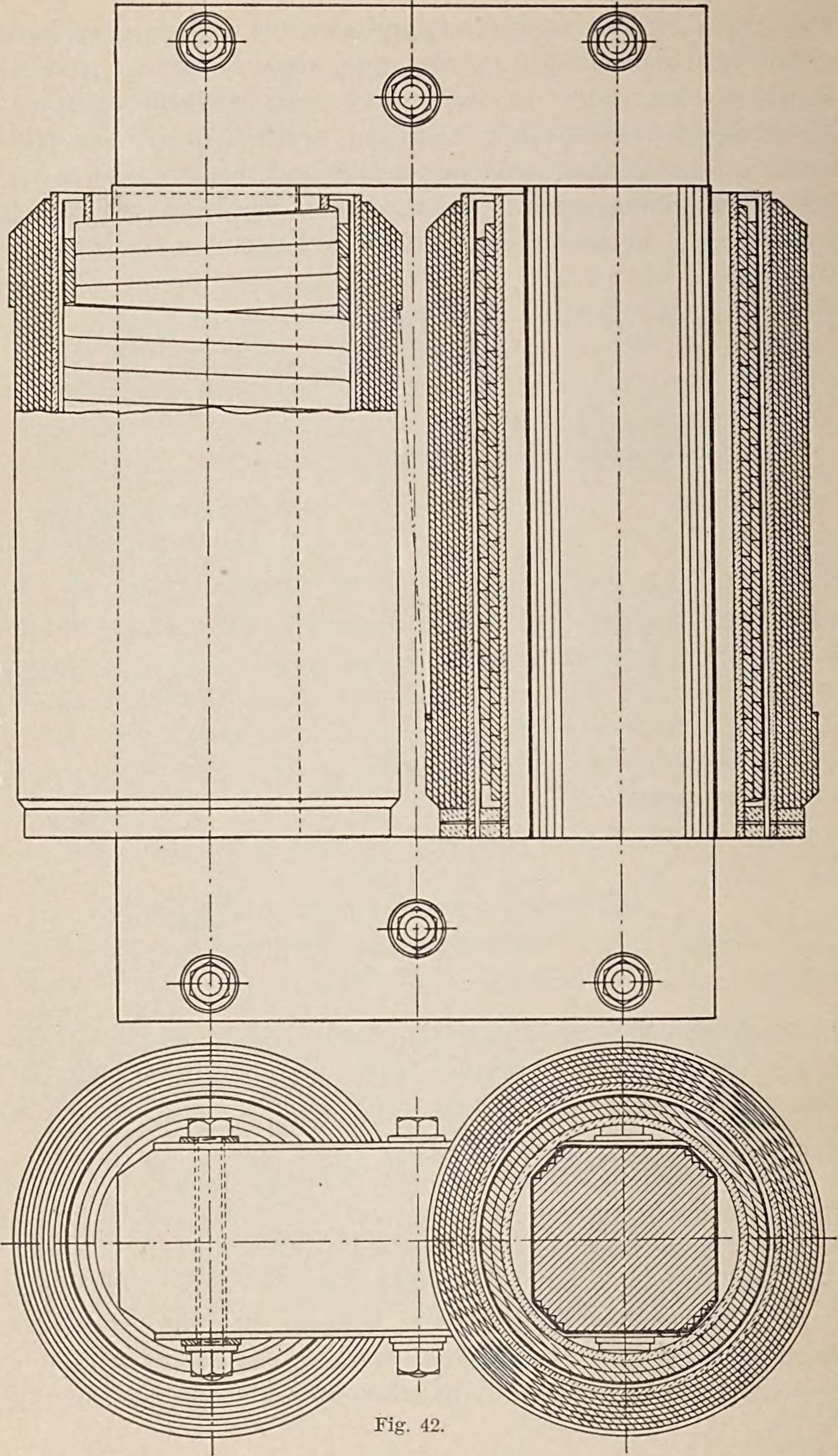


Fig. 42.

cylinder mit Flanschen versehen sein, welche die Wickelung gegen Heruntergleiten schützen. Am oberen Ende sind Flanschen entbehrlich, wenn man die Drähte am Ende jeder Lage entsprechend zurückbindet. Es empfiehlt sich, nach Vollendung jeder Lage dieselbe mit dünner, paraffinierter Leinwand zu umhüllen, deren Ende vor der Anbringung der nächsten Lage zurückgeschlagen wird, so daß die benachbarten Drähte aller Lagen außer durch ihre Baumwoll-Umspinnung noch durch die Leinwandschichte isoliert sind.

Die Dicke der Baumwoll-Umspinnung richtet sich nach dem Durchmesser der Drähte (oder dem äquivalenten Durchmesser bei rechteckigen Drähten), der Spannung und der Art der Bespinnung. Die Bespinnung muß wenigstens doppelt sein; dreifache Bespinnung ist jedoch vorzuziehen. Bei sehr starken Drähten kann außer einer Umspinnung noch eine Umklöppelung verwendet werden. Für Spannungen bis zu 3000 Volt soll die Dicke der Umhüllung, wenn feine Baumwolle oder feines Garn dazu verwendet wird, wenigstens den nach folgender Formel berechneten Wert haben:

$$\delta = 0,13 + 0,06 d,$$

wobei d den Drahtdurchmesser bedeutet. Die Werte sind in Millimetern einzusetzen. Der Durchmesser des besponnenen Drahtes ist also

$$\begin{aligned} d_1 &= d + 2\delta \\ d_1 &= 0,26 + 1,12 d. \end{aligned}$$

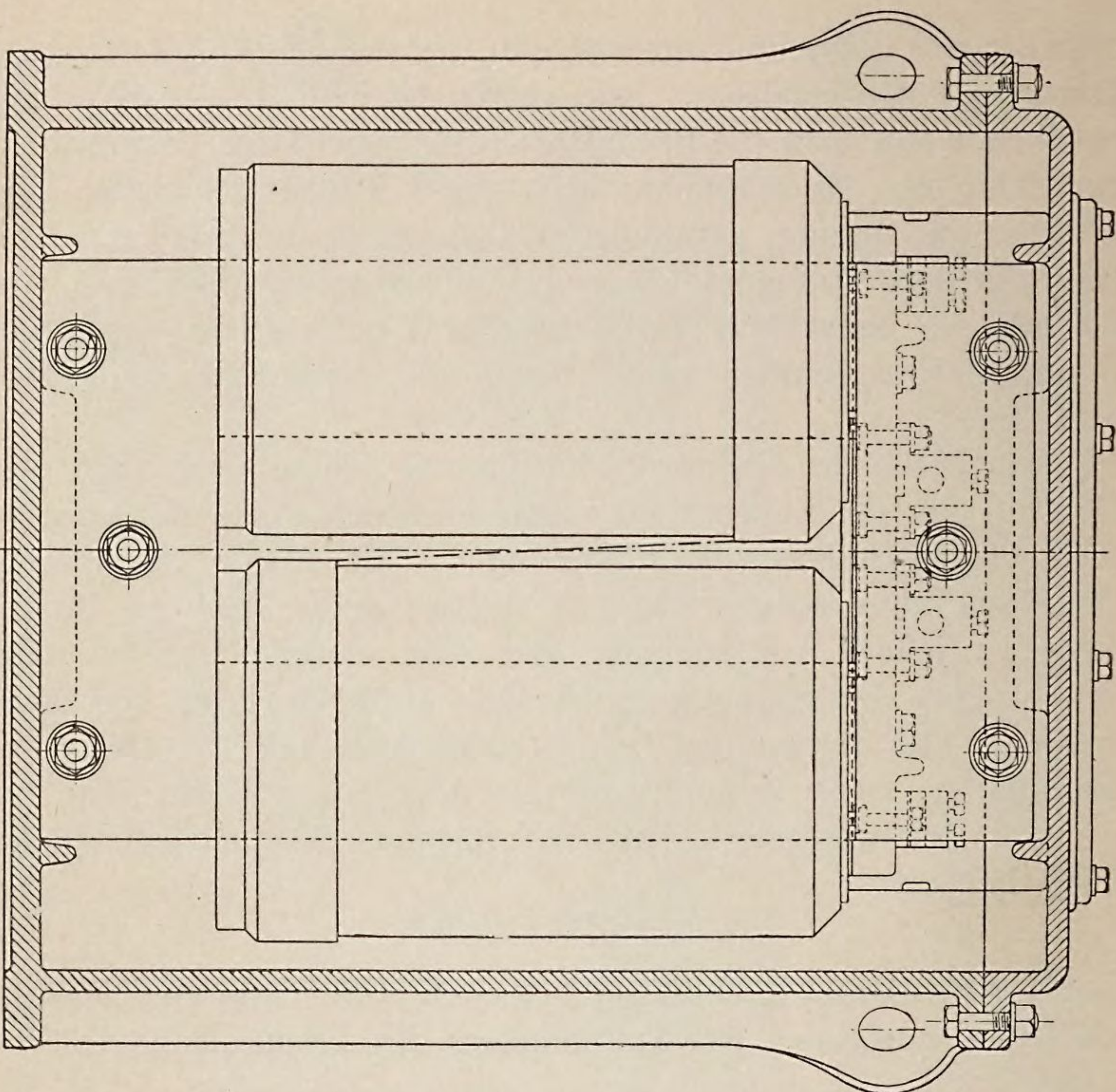
Der Widerstand des Drahtes muß mit Rücksicht auf die Erwärmung bei Dauerbetrieb berechnet werden. Für die vorläufige Rechnung kann man dabei die Formel benutzen

$$w = \frac{0,02 l}{a} \text{ Ohm,}$$

wobei l die Länge in Metern und a den Querschnitt in Quadratmillimetern bedeutet. Diese Formel beruht auf der Annahme, daß die Temperatur der Spulen 75°C . beträgt.

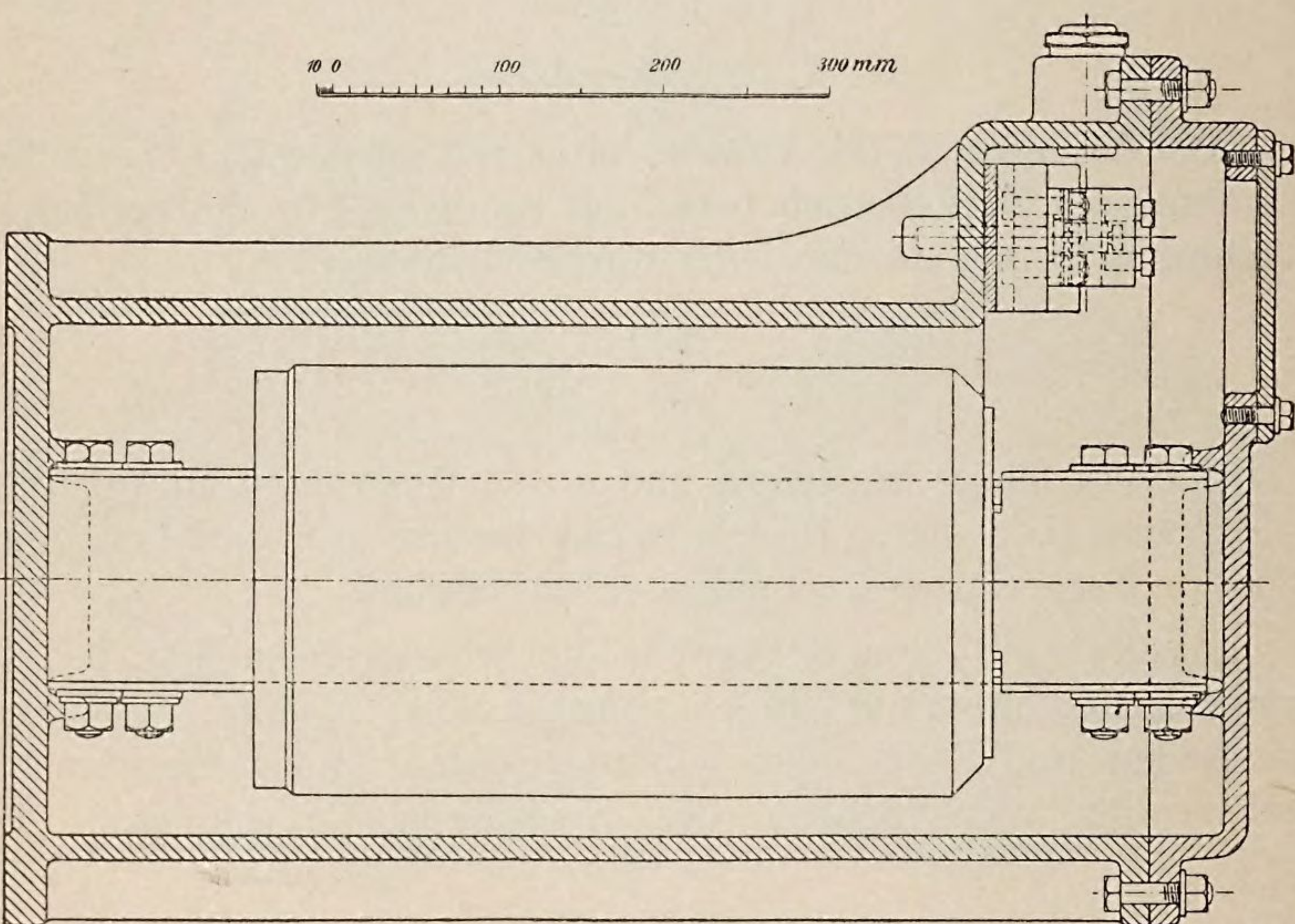
Das Gehäuse kann, wie in den Figuren veranschaulicht, behufs besserer Abkühlung mit Rippen versehen sein. Zudem sind innen am Boden und Deckel des Gehäuses kleine Rippen angebracht, welche die Verschiebung des Eisenkörpers verhindern. Es

Fig. 43.



0 100 200 300 mm

Fig. 44.



empfiehlt sich, an dem Deckel einen kleinen besonderen Deckel anzubringen, um dadurch den Zugang zu den Klemmschrauben möglich zu machen, ohne daß man den großen Deckel abzunehmen braucht. Die Zuleitungskabel können durch Stopfbüchsen mit Kautschukringdichtung, wie in der Figur gezeigt, geführt werden oder sie können einfach durch geeignete Löcher eingebracht werden, welche dann mit Isolirmasse ausgegossen werden. Letztere Anordnung empfiehlt sich bei Transformatoren für große Leistung.

Sechstes Kapitel.

Arbeitsdiagramme. — Leerlauf. — Belastung. — Streuung. — Arbeitsdiagramme für Transformatoren mit Streuung. — Spannungsabfall. — Graphische Bestimmung des Spannungsabfalles.

Arbeitsdiagramme. Die Arbeitsverhältnisse eines Transformators lassen sich in einfacher Weise durch Vektordiagramme darstellen. Dabei ist es bequem, wenn man für die sekundären und primären Spulen die gleiche Windungszahl annimmt, d. h. voraussetzt, daß das Umsetzungsverhältnis gleich Eins sei. Diese Annahme ist ohne weiteres gestattet, wenn man sich vergegenwärtigt, daß, ohne sonst etwas an der Konstruktion zu ändern, eine entsprechende Anzahl der Windungen in der Hochspannungsspule parallel geschaltet werden. Ist z. B. das Umsetzungsverhältnis in Wirklichkeit 2000 zu 100, und hat die Hochspannungsspule 800 Windungen, so kann man sich vorstellen, daß je 20 dieser Windungen parallel geschaltet werden, also der 20fache Strom durch die Primärspule fließt, und zwar unter ein Zwanzigstel der Spannung, welche mithin jetzt nicht mehr 2000, sondern nur mehr 100 Volt beträgt. Es wird dadurch an der Erwärmung, dem prozentualen Leerlaufstrom, Wirkungsgrad u. s. w. nichts geändert, wir erzielen aber den Vorteil, daß die elektromotorischen Kräfte in den beiden Spulen auf dieselbe Größenordnung gebracht, also im Vektordiagramm nach demselben Maßstab bequem eingezeichnet werden können. Dabei ist zu beachten, daß die Stromstärke in demselben Verhältnisse steigt, als die Windungszahl reduziert wird, der Widerstand jedoch im quadratischen Verhältnisse abnimmt.

Leerlauf. Wir wollen zunächst den einfachsten Fall betrachten, nämlich einen Transformator unter Leerlauf. Es sei in Fig. 45 $O I_0$ der berechnete Leerlaufstrom, nach einem beliebigen

Mafsstabe eingetragen. Dieser Strom setzt sich aus zwei Komponenten zusammen, I_μ und I_h , welche, wie früher gezeigt wurde, berechnet werden können. Wir tragen diese auch im gleichen Mafsstabe ein. Der Kern wird durch den Strom I_μ magnetisiert, und der magnetische Fluß wird in jedem Augenblicke durch die Horizontalprojektion eines Vektors ON dargestellt, welcher mit dem Stromvektor I_μ der Richtung nach zusammenfällt. In dem Augenblicke, auf den sich das Diagramm bezieht, ist die Projektion Null und die in der Primärspule erzeugte EMK ein Maximum, nämlich $2\pi \sim Nn 10^{-8}$ Volt. Da diese EMK das Anwachsen des

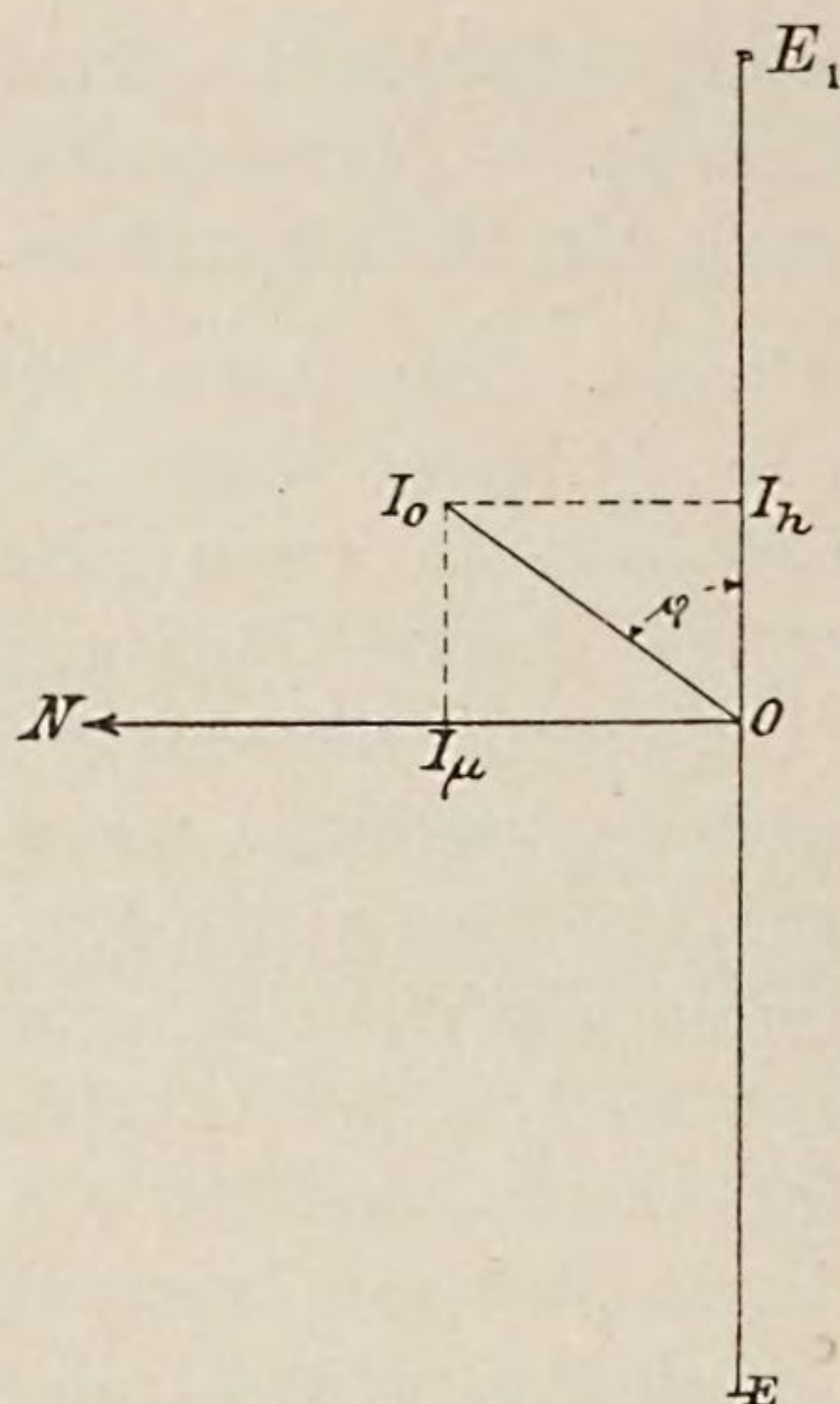


Fig. 45.

Stromes zu verhindern sucht, muß sie im Diagramm nach unten hin aufgetragen werden. Es sei das die nach einem beliebigen Mafsstabe bemessene Strecke OE . Die in diesem Augenblicke herrschende Spannung des Betriebsstromes muß offenbar gleich und entgegengesetzt gerichtet sein. Das gibt den Vektor OE_1 , welcher die primäre Klemmenspannung vorstellt. Dabei vernachlässigen wir den äußerst geringen, durch den Widerstand der Primärspule verursachten Spannungsabfall. In der gleichen Weise stellt OE die Klemmenspannung der Sekundärspule dar.

Der zugeführte Effekt ist offenbar $\frac{I_h E_1}{2} = \frac{I_0 \cos \varphi E_1}{2}$. Wenn wir in das Diagramm nicht maximale, sondern effektive Werte

einzeichnen und diese mit kleinen Buchstaben bezeichnen, so haben wir den zugeführten Effekt beim Leerlauf

$$i_h e_1 = \cos \varphi i_0 e_1.$$

Der scheinbar zugeführte Effekt ist $i_0 e_1$, und das Verhältnis des wirklichen zum scheinbaren Effekt, also die durch $\cos \varphi$ dargestellte Zahl, nennt man den Leistungsfaktor.

Es ist wichtig, zu beachten, daß das durch den Magnetisierungsstrom i_0 erzeugte Feld ON weder der Lage, noch der Größe nach mit jenem Felde übereinstimmt, welches durch einen konstanten Strom von der Stärke i_0 erzeugt würde. Das ist auf den ersten Blick befremdend, denn der Strom i_0 geht thatsächlich durch die Primärspule, und man sollte also glauben, daß er das Eisen seiner Ampèrewindungszahl gemäß magnetisieren muß. Das ist jedoch nicht der Fall. Die Magnetisierung ist geringer, als dieser Erregung entspricht, und bleibt auch hinter dem Strom der Zeit nach zurück. Die Nacheilung ist im Diagramm durch den Winkel $\frac{\pi}{2} - \varphi$ gegeben. Dieser scheinbare Widerspruch läßt sich jedoch leicht auf folgende Weise erklären. Der Verlust bei Leerlauf wird durch Hysteresis und Wirbelströme erzeugt. Wenn wir ein Eisen hätten, welches in magnetischer Beziehung vollkommen ist, und den Transformator so konstruieren könnten, daß absolut keine Wirbelströme entstehen, so wäre $i_h = 0$ und $i_\mu = i_0$. Der Leistungsfaktor wäre dann auch gleich Null. Nun nehmen wir an, daß wir thatsächlich einen solchen Transformator hätten, so können wir ihn durch die Zugabe einer dritten kurzgeschlossenen Wickelung von entsprechendem Widerstand soweit verschlechtern, daß sein Arbeitsdiagramm genau mit dem des praktisch ausführbaren Transformators übereinstimmt. Wir brauchen bloß die dritte Wickelung so zu konstruieren, daß der darin aufgebrauchte, d. h. in Wärme umgesetzte Effekt genau gleich ist dem Arbeitsverlust des unvollkommenen (also mit Hysteresis und Wirbelströmen behafteten) Transformators. Nun schwächen aber die Ströme in dieser dritten kurzgeschlossenen Wickelung die magnetisierende Wirkung des Betriebsstromes ab, weil sie im allgemeinen entgegengerichtet sind, und daher kommt es, daß nicht der ganze Leerlaufstrom magnetisierend wirkt, sondern nur jene Komponente desselben, welche dem in der dritten Spule fließenden Strome um eine Viertelperiode vorausseilt. Da

wir imstande sind, durch geeignete Wahl der Windungszahl und des Widerstandes der dritten Spule den Effektverlust in ihr dem Verlust in dem wirklichen Transformator genau gleich zu machen, so kann sie als ein magnetisches und elektrisches Äquivalent für die Unvollkommenheiten des wirklichen Transformators angesehen werden; mit anderen Worten, wir können uns alle Verluste durch elektrische Ströme im Eisenkern entstanden denken, welche Ströme entmagnetisierend wirken. Damit ist der oben erwähnte scheinbare Widerspruch aufgeklärt.

Belastung. Wir wollen jetzt das Arbeitsdiagramm des belasteten Transformators betrachten. Dabei machen wir zunächst noch zwei Voraussetzungen; erstens, daß der Transformator absolut keine Streuung hat, und zweitens, daß die Belastung aus einem ganz induktionsfreien Widerstande besteht.

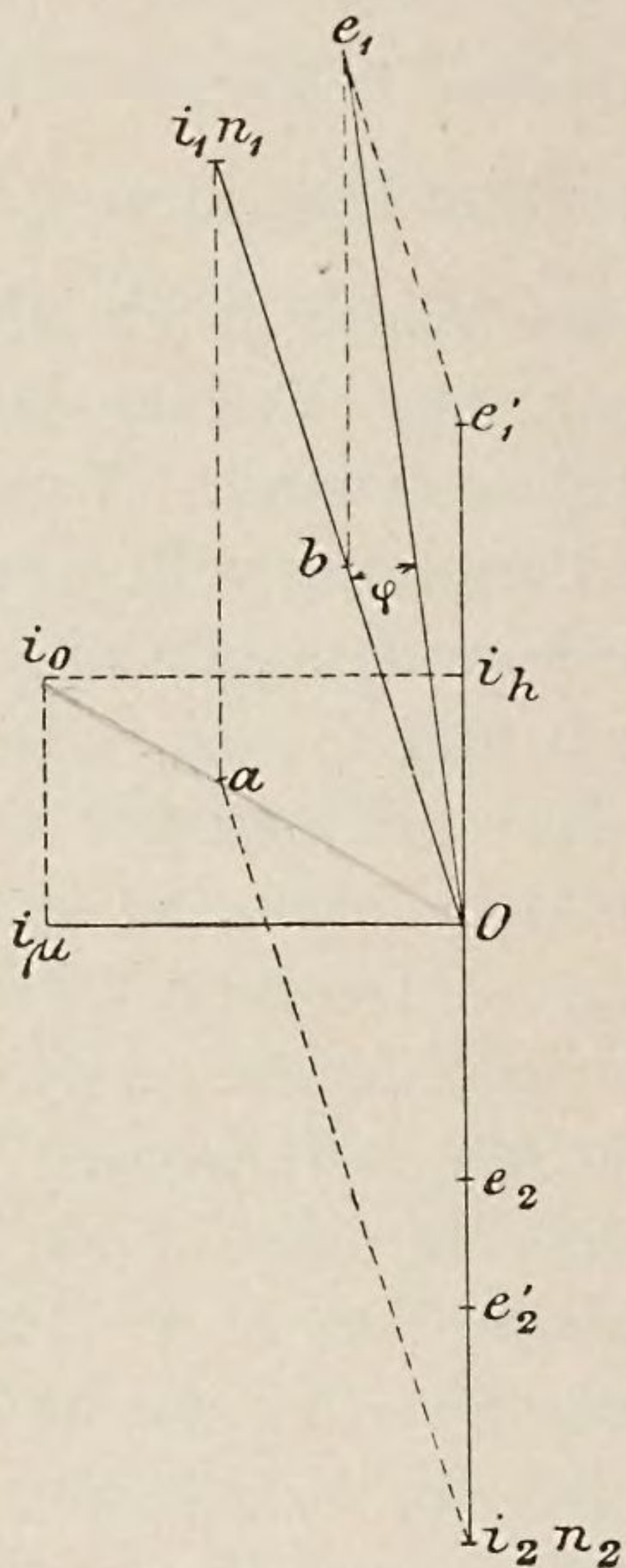


Fig. 46.

Unter diesen Umständen muß der sekundäre Strom der EMK in der Sekundärspule proportional sein und mit ihr der Richtung nach zusammenfallen. Bezeichnet i_μ (Fig. 46) wieder den Magnetisierungsstrom, so ist e'_2 die unter rechtem Winkel nacheilende

EMK der Sekundärspule und e_1' die um den gleichen Winkel vorauseilende EMK der Primärspule. Die sekundäre Klemmenspannung sei Oe_2 , wobei die Strecke e_2e_2' den Spannungsverlust infolge des Widerstandes der Sekundärspule darstellt. Um die primäre Klemmenspannung der Lage und Gröfse nach zu finden, verfahren wir folgendermaßen. Wir tragen nach einem beliebigen Maßstabe die sekundären Ampèrewindungen i_2n_2 auf und nach demselben Maßstabe die Ampèrewindungen Oa des Leerlaufstromes i_0 . Die Linie Oa muß die Resultierende der primären und sekundären Ampèrewindungen sein, und da letztere gegeben sind, kann man erstere durch Zeichnung eines Parallelogrammes ohne weiteres finden. Wir erhalten somit i_1n_1 und mit Berücksichtigung der Verschiedenheit in den gewählten Maßstäben für Ampère und Ampèrewindungen auch den Primärstrom i_1 . Dieser Strom wird durch eine EMK getrieben, welche sich aus zwei Komponenten zusammensetzt. Erstens die Komponente Oe_1' , welche zur Überwindung der Gegen-EMK nötig ist (dieselbe ist gleich und entgegengesetzt Oe_2'), und zweitens jene EMK, welche zur Überwindung des ohmschen Widerstandes der Primärspule nötig ist. Sei diese durch die Strecke Ob dargestellt, so finden wir wieder durch Zeichnen eines Parallelogrammes die Klemmenspannung Oe_1 , welche der Primärspule zugeführt werden muß, damit die Sekundärspule den Strom i_2 unter der Klemmenspannung Oe_2 abgibt. Wie man sieht, ist $e_1 > e_2$, und zwar ist der Unterschied ziemlich groß, weil wir wegen größerer Klarheit im Diagramm die zur Magnetisierung nötigen Ampèrewindungen sowohl als auch alle Verluste viel zu groß angenommen haben.

Unter der Annahme, daß das Diagramm für effektive Werte gezeichnet ist, haben wir:

Zugeführter Effekt	$e_1 i_1 \cos \varphi$
Abgegebener Effekt	$e_2 i_2$
Wirkungsgrad η	$\frac{e_2 i_2}{e_1 i_1 \cos \varphi}$

In guten Transformatoren ist der Leerlaufstrom nur $1/20$ bis $1/60$ des vollen Betriebsstromes. Es ist also die Strecke Oa im Vergleich zur Strecke Oi_2n_2 bei Vollbelastung sehr klein, und mithin fällt die Linie Oi_1n_1 , d. h. der Vektor des Primärstromes, nahezu in die Vertikale. Dadurch wird aber der Winkel φ verschwindend

klein, und sein cosinus kann ohne erheblichen Fehler gleich 1 gesetzt werden. Der Wirkungsgrad ist also dann einfach

$$\eta = \frac{e_2 i_2}{e_1 i_1}.$$

Streuung. Bisher haben wir angenommen, daß der Transformator keine magnetische Streuung hat, daß also genau der gleiche Kraftlinienfluß durch alle Windungen sowohl der primären, als auch der sekundären Spule geht. Diese Bedingung ist jedoch im allgemeinen nicht erfüllt. Die praktische Notwendigkeit, die beiden Windungen in gesonderten Spulen derart anzuordnen, daß zwischen ihnen noch ein genügender Isolationsraum bleibt, bringt es mit sich, daß durch diesen Raum, sowie mehr oder weniger durch den Wickelungsraum der Spulen selbst magnetische Streufelder verlaufen, wodurch die gegenelektromotorische Kraft der treibenden (primären) Spule erhöht und die in der getriebenen (sekundären) Spule erzeugte EMK verringert wird. Diese Wirkung ist umso stärker, je größer die Belastung ist. Bei Leerlauf verschwindet sie, und dann ist das Umsetzungsverhältnis des Transformators genau jenes, welches durch die Windungszahlen in beiden Spulen gegeben ist.¹⁾ Bei Belastung ist das Umsetzungsverhältnis größer, und die sekundäre Klemmenspannung sinkt.

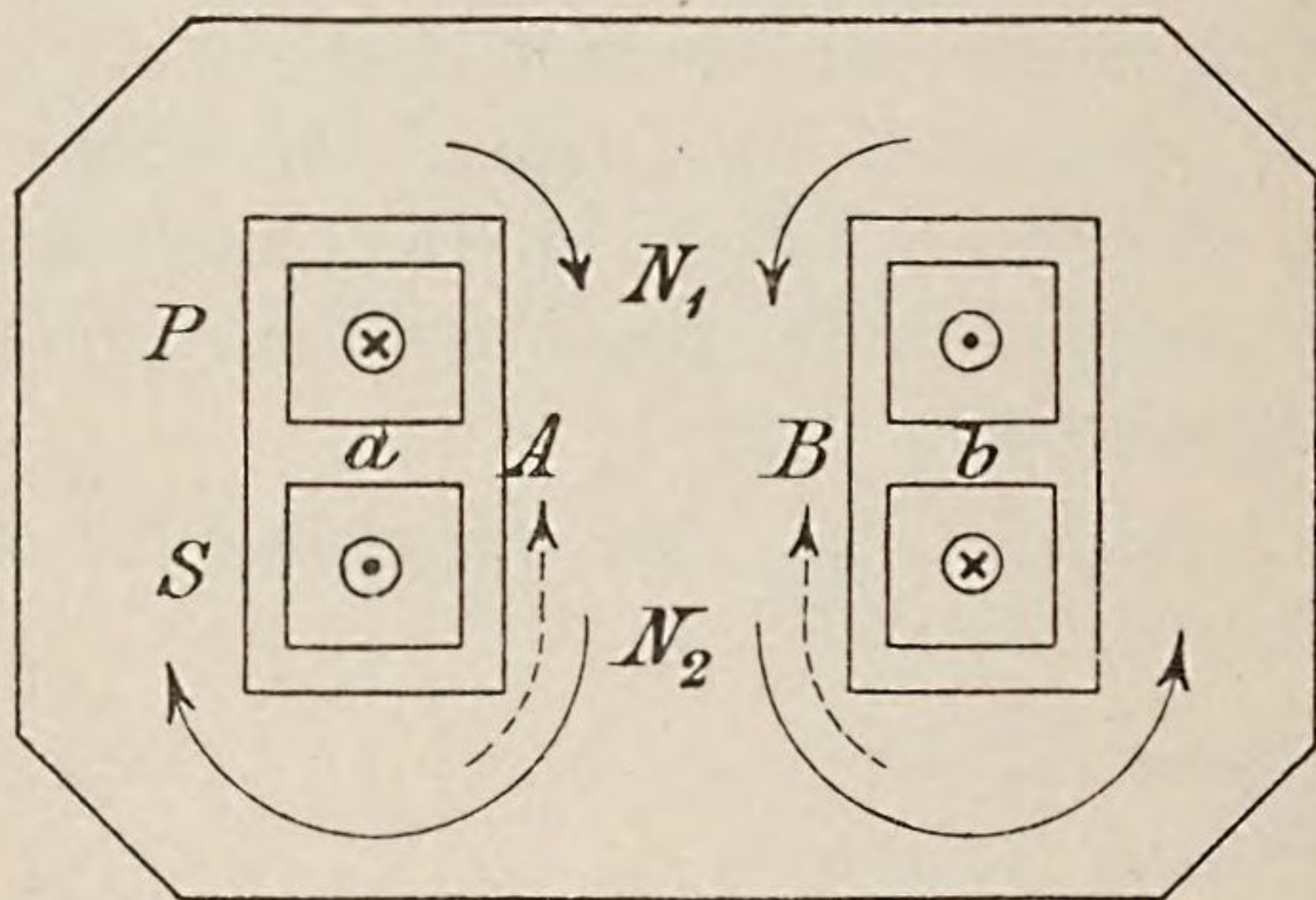


Fig. 47.

Diese Wirkung der magnetischen Streuung möge an einem Beispiel veranschaulicht werden. Es stellt Fig. 47 einen Durch-

¹⁾ Eine kleine Abweichung kann allerdings noch durch die Kapazität der Hochspannungsspule entstehen, wenn man von niederer auf hohe Spannung transformiert.

schnitt des Transformators dar, und es seien P und S die nebeneinander liegenden Primär- und Sekundärspulen. In einem gewissen Augenblicke sei die Richtung der Ströme in den beiden Spulen wie in der Figur gezeichnet. Die treibende Spule P erzeugt ein Feld in der durch die voll ausgezogenen Pfeile angedeuteten Richtung. Die getriebene Spule ist bestrebt, ein Feld zu erzeugen, welches in der umgekehrten Richtung verläuft, wie das durch die punktierten Pfeile angedeutet ist. Dieses Feld kommt jedoch nicht zu stande, weil die Ampèrewindungen der treibenden Spule überwiegen. Die Richtung des wirklich erzeugten Feldes ist also durch den ganzen Kern von oben nach unten, seine Stärke nimmt jedoch nach unten zu ab, indem bei A und B Kraftlinien durch Streuung nach links und rechts hin zur Seite gedrängt werden und durch die Zwischenräume a und b gehen, um sich oberhalb der Spule P mit dem durch diese Spule erzeugten Felde zu vereinigen. Dieses seitliche Hinausdrängen findet in geringerem Maße über die ganze Länge des Kernes hin statt; da es sich aber nicht um eine quantitative Bestimmung der Wirkung dieser Streufelder handelt, wollen wir die Untersuchung auf die Stellen A und B beschränken. Es enthalte das durch die treibende Spule erzeugte Feld N_1 Kraftlinien, und es werden N_0 Kraftlinien seitlich durch die Räume a und b hinausgedrängt, dann gehen $N_2 = N_1 - N_0$ Kraftlinien um die getriebene Spule S herum, und die elektromotorische Kraft, welche in dieser Spule erzeugt wird, ist also nicht N_1 , sondern $N_1 - N_0$ proportional. Bei Leerlauf führt die getriebene Spule keinen Strom, hat also auch kein Bestreben, ein Gegenfeld zu erzeugen, so daß bei A und B keine Streuung und auch kein Hinausdrängen von Kraftlinien stattfindet. In diesem Falle ist $N_0 = 0$ und $N_2 = N_1$. Die EMK ist also N_1 proportional und mithin größer als bei Belastung. Wird die Primärspannung konstant erhalten, so ist daher die sekundäre Klemmenspannung bei Leerlauf größer als bei Belastung. Der so verursachte Spannungsabfall wird offenbar um so größer sein, je größer N_0 im Vergleich zu N_1 ist. Nun hängt aber N_0 von verschiedenen Umständen ab. In erster Linie ist ersichtlich, daß N_0 mit steigender Belastung des Transformators wächst; denn je mehr Strom durch die Spulen geht, um so größer ist die Zahl der Ampèrewindungen, welche sich bei A und B sozusagen stauen und den magnetischen Seitendruck hervorrufen, welcher die Kraft-

linien links und rechts herausdrängt. Der Spannungsabfall muß also mit der Belastung steigen. Ferner ist das Streufeld um so größer, je kleiner der magnetische Widerstand seines Pfades ist, d. h. je kürzer die Strecke vom Kern zum Mantel und je größer die Flächen bei A und B , d. h. je weiter die Spulen von einander abstehen. Es ist also die in Fig. 47 dargestellte Konstruktion ungünstiger als jene, welche in Fig. 48 veranschaulicht ist.

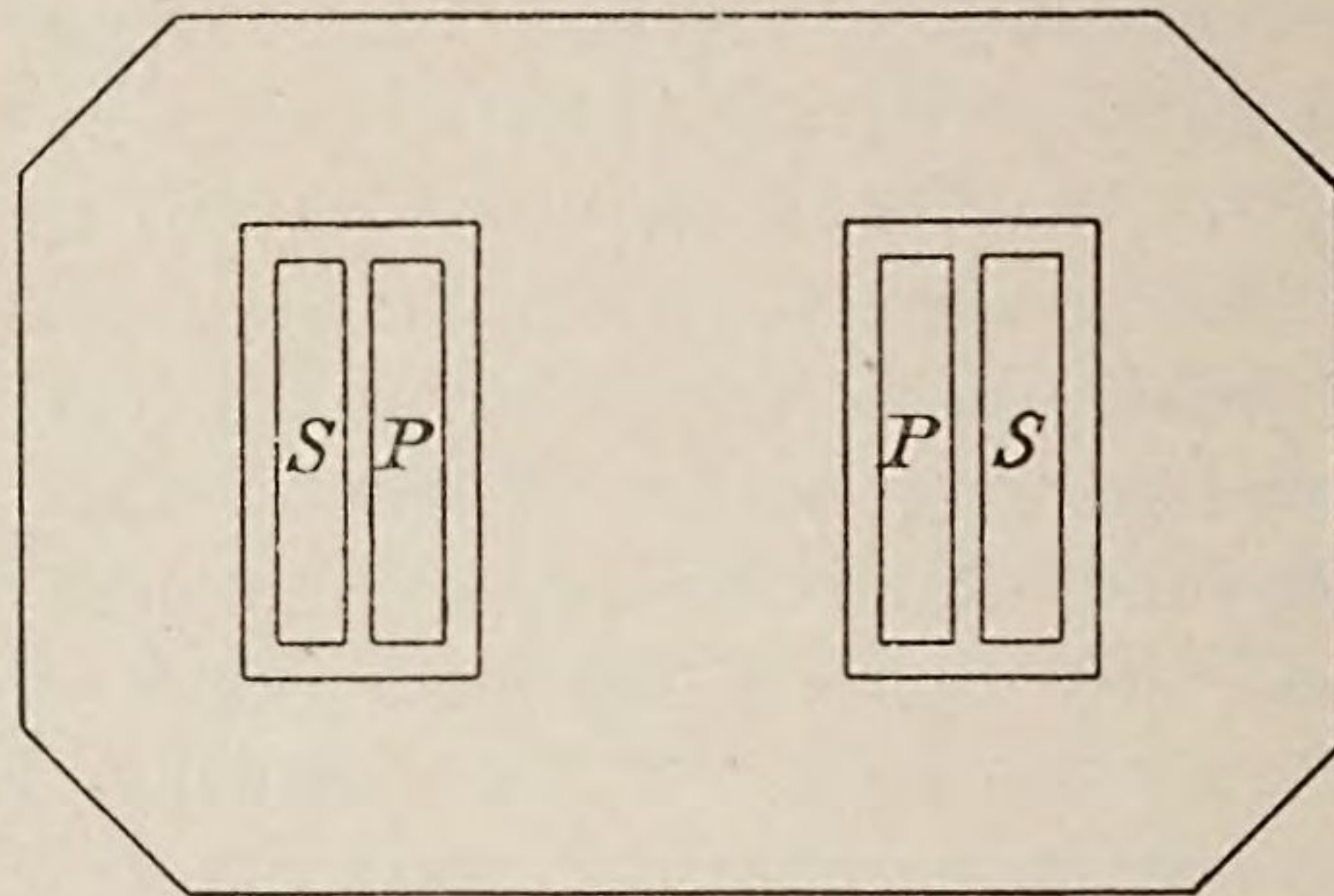


Fig. 48.

Denn in letzterer sind beide Spulen dicht auf einander gewickelt, die Räume a und b also sehr schmal und bieten dem Streufeld nur einen engen Pfad. Überdies ist die Länge des Pfades jetzt größer als früher. Es wird also diese Anordnung einen kleineren Spannungsabfall herbeiführen als die in Fig. 47.

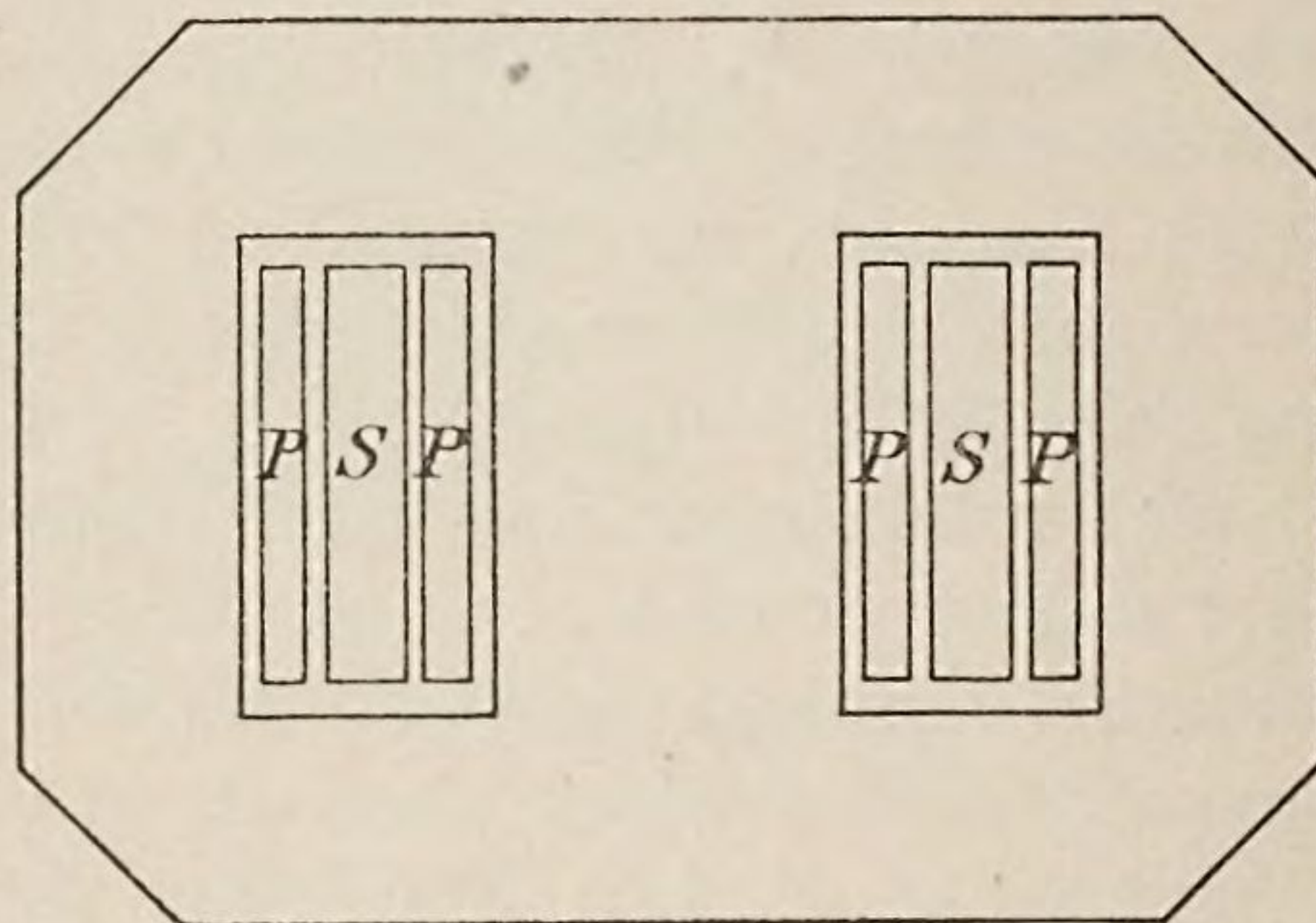


Fig. 49.

Eine weitere Verbesserung kann dadurch gemacht werden, daß man eine oder beide Spulen in Abteilungen zerlegt, weil dadurch die magnetische Stauung an den Berührungsstellen der

treibenden und getriebenen Spulen vermindert wird. So ist z. B. in Fig. 49 die Primärspule in zwei Hälften angeordnet; jede hat im Vergleich mit Fig. 48 nur die halbe Anzahl von treibenden Ampèrewindungen, und die Streuung ist mithin bedeutend kleiner.

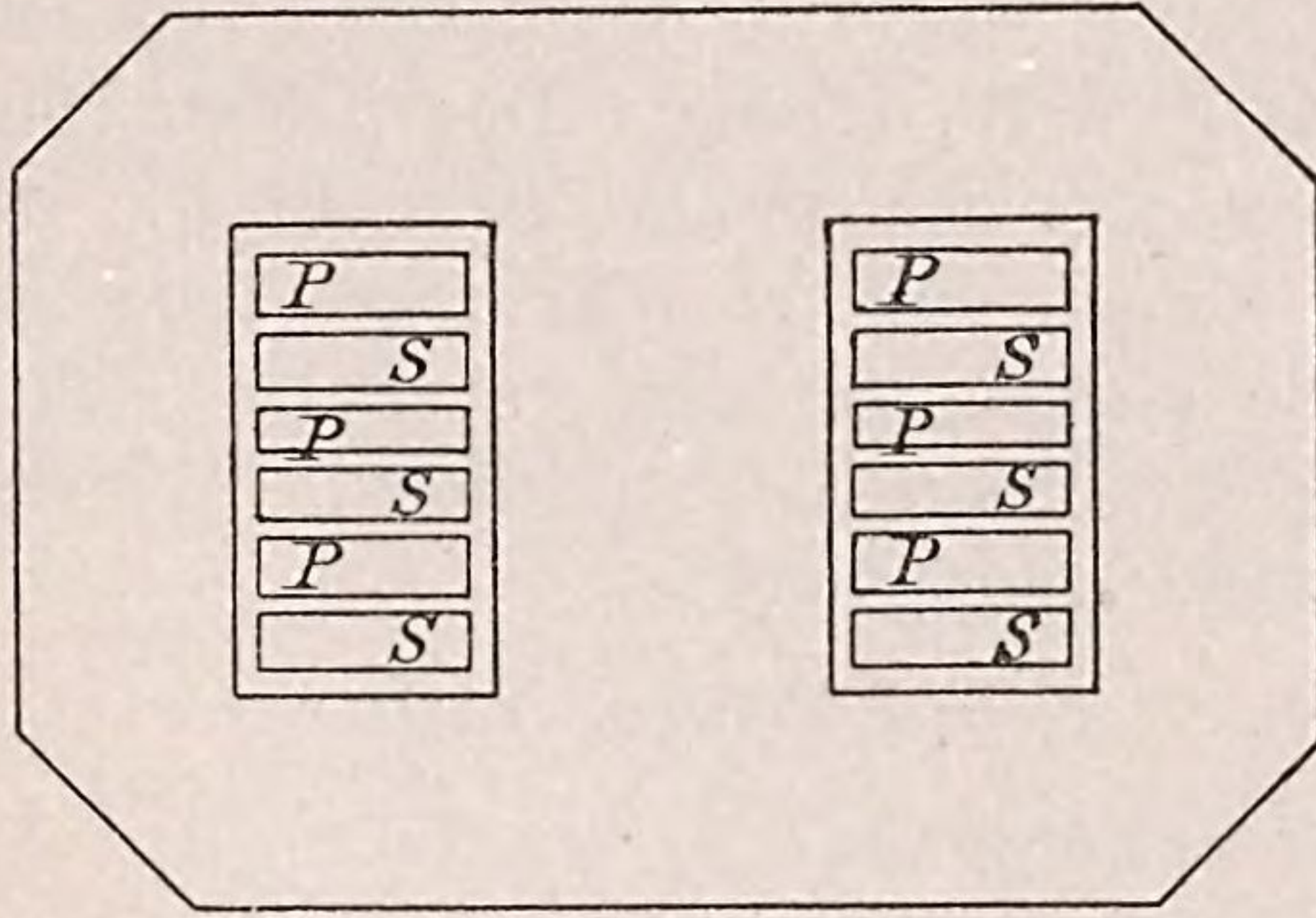


Fig. 50.

Noch besser ist die Anordnung Fig. 50, weil dabei die Spulen in beliebig kleinen Abteilungen und zwar unabhängig von einander hergestellt und angebracht werden können.

Die Wirkung der Streuung kann nach dem oben Gesagten so aufgefaßt werden, daß zu dem beiden Spulen gemeinsamen Felde noch zwei Felder hinzukommen und zwar ein positives, welches die treibende (primäre), und ein negatives, welches die getriebene (sekundäre) Spule durchsetzt. Wir können uns also den wirklichen, mit magnetischer Streuung behafteten Transformator durch einen idealen, d. h. streuungslosen, Transformator

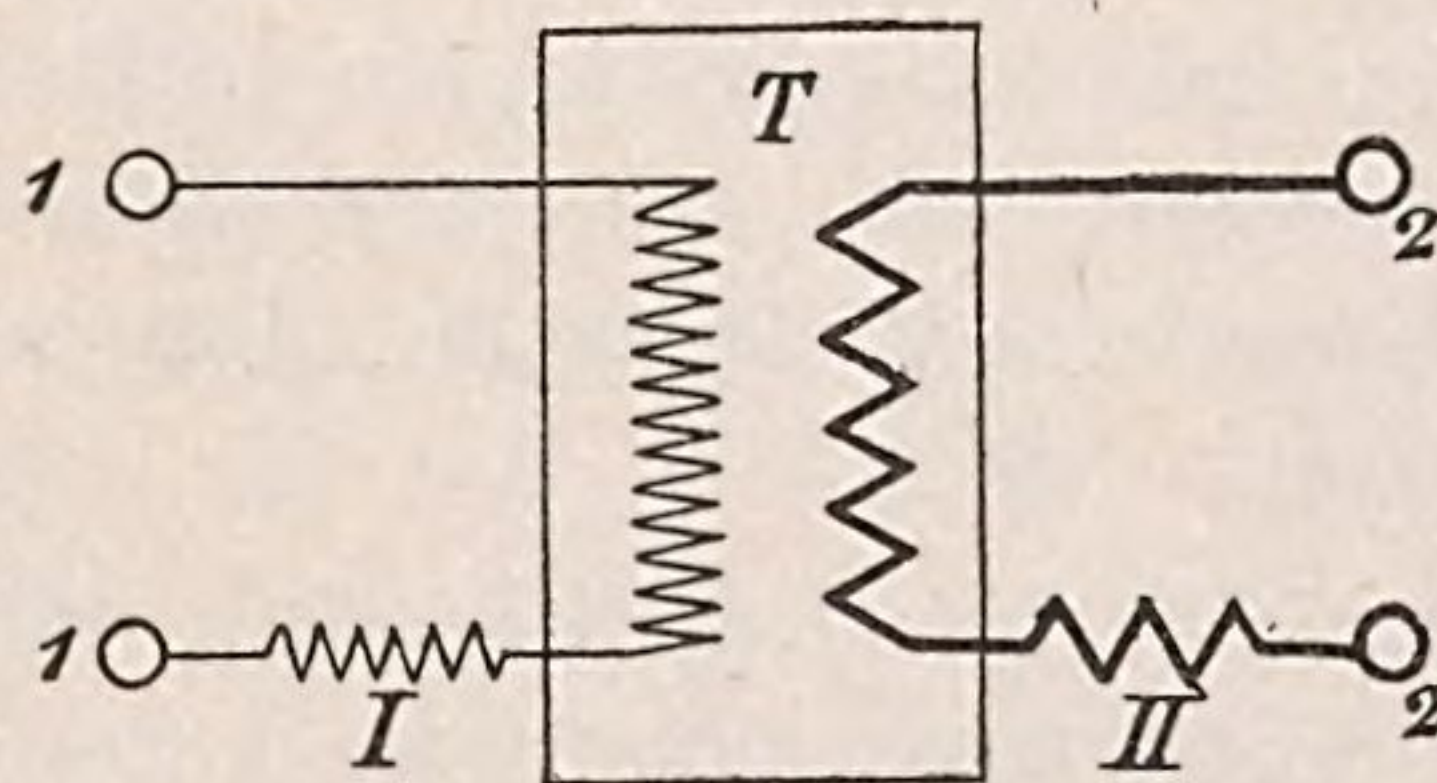


Fig. 51.

ersetzt denken, in dessen Zuleitungen wir kleine, mit Selbstinduktion behaftete Spulen einsetzen. Die Klemmschrauben müssen dann als außerhalb dieser Zusatzspulen liegend angenommen werden, wie das Fig. 51 zeigt, wo T den idealen Trans-

formator darstellt und I und II die im Primär- und Sekundärstromkreis eingeschalteten Zusatzspulen. Die Primär-Klemmschrauben seien die Punkte 1, 1 und die Sekundär-Klemmschrauben die Punkte 2, 2.

Bei Vollbelastung werde in der Spule I das Feld N_1 und in der Spule II das Feld N_2 erzeugt. Das beiden Hauptspulen des idealen Transformators gemeinsame Feld sei N . Der Einfachheit halber nehmen wir an, daß die Windungszahl in den Haupt- und Zusatzspulen die gleiche ist; dann sind die elektromotorischen Kräfte den Feldstärken direkt proportional. Wir haben also die EMK der primären Hauptspule

$$e_1 = 4,44 \sim n_1 N 10^{-8}$$

und jene in der Zusatzspule I

$$e_{s_1} = 4,44 \sim n_1 N_1 10^{-8}.$$

Ebenso für die Sekundärwicklung

$$e_2 = 4,44 \sim n_2 N_2 10^{-8}$$

$$e_{s_2} = 4,44 \sim n_2 N_2 10^{-8}.$$

Dabei ist zu bemerken, daß im Vektordiagramm e_{s_2} auf i_2 und e_{s_1} auf i_1 senkrecht stehen muß, weil eben die elektromotorischen Kräfte der Selbstinduktion dann die maximalen Werte annehmen, wenn die betreffenden Ströme durch Null gehen.

Arbeitsdiagramme für Transformatoren mit Streuung. Wir können jetzt für den Fall, daß der Transformator Streuung hat, das Vektordiagramm zeichnen und nehmen dabei zunächst an, daß die Belastung aus einem vollkommen induktionslosen Widerstande besteht, also etwa aus Glühlampen. Der Einfachheit halber nehmen wir vorläufig an, daß beide Spulen gleichviel Windungen haben.

Es bedeute die Strecke Oi_2 (Fig. 52) den Sekundärstrom, Oe_{k_2} die Sekundärklemmenspannung, $e_{k_2} e_2'$ den Spannungsverlust durch ohmschen Widerstand; dann muß Oe_2' die Resultante sein aus der in der Spule durch das Feld N erzeugten EMK Oe_2 und der EMK der Selbstinduktion e_{s_2} , welche durch das Streufeld N_2 erzeugt wird. Der Vektor der letzteren muß eine solche Lage haben, daß e_{s_2} die Abnahme von i_2 zu verhindern trachtet, er muß also horizontal nach rechts gezeichnet werden. Der nach

obiger Gleichung für e_{s_2} berechnete Wert sei im gleichen Maßstab durch die Länge Oe_{s_2} gegeben. Dann bestimmt sich durch Zeichnung des Parallelogrammes die in der Sekundärspule induzierte EMK Oe_2 .

Der Magnetisierungsstrom i_μ muß auf Oe_2 senkrecht stehen, während der zur Deckung der Verluste nötige Strom i_h in der Verlängerung dieser Linie liegt. Wir finden somit Oi_0 , den Vektor

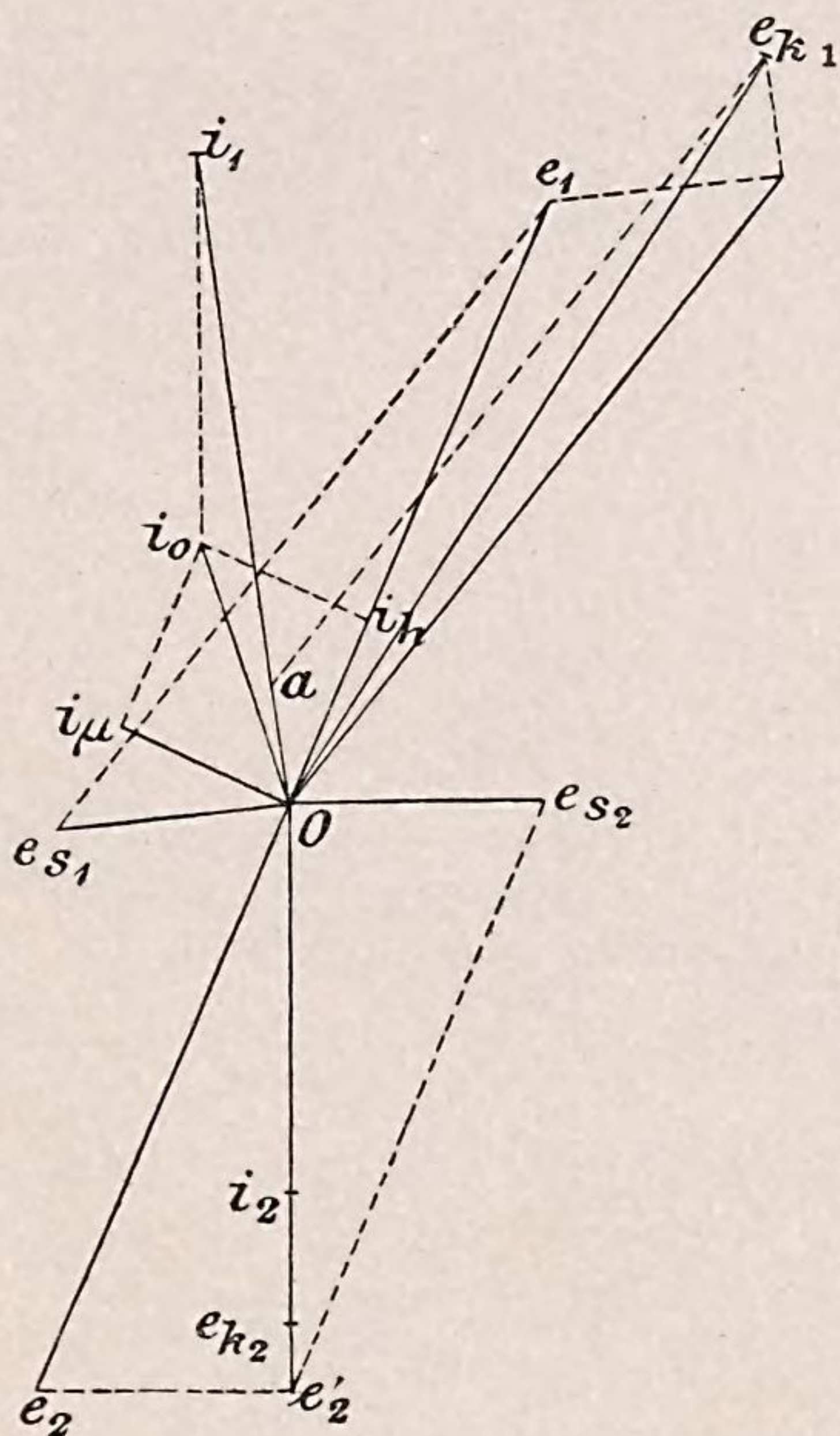


Fig. 52.

des Leerlaufstromes, und durch Zusammensetzung mit Oi_2 den Vektor des Primärstromes Oi_1 . Die EMK der Selbstinduktion des Primärstromes muß auf Oi_1 senkrecht stehen und nacheilen. Ihr Vektor muß also von O aus nach links eingetragen werden. Es sei das die Strecke Oe_{s_1} . Die primäre Klemmenspannung muß nun drei Komponenten enthalten. Die eine, welche der durch das Feld N erzeugten EMK Oe_2 gleich und entgegengesetzt gerichtet ist, nämlich Oe_1 , die zweite, welche der EMK der Selbstinduktion Oe_{s_1} gleich und entgegengesetzt gerichtet ist, und die dritte, welche den ohmischen Spannungsabfall Oa in der Primärspule

deckt. Wir finden also nach den Regeln des Seilpolygones den Vektor der Primärklemmenspannung Oe_{k_1} . Wie man leicht erkennt, muß e_{k_1} größer sein als e_{k_2} , d. h. es findet bei Belastung ein Spannungsabfall statt, der um so größer ist, je größer die EM-Kräfte e_{s_1} und e_{s_2} und je größer die ohmischen Widerstände der Spulen sind. In beiden Beziehungen ist das Diagramm (Fig. 52) übertrieben gezeichnet worden, um die Konstruktion leichter verständlich zu machen.

Es ist von Interesse, den Fall zu untersuchen, wo die sekundäre Klemmenspannung Null ist. Dieser Fall tritt ein, wenn man den Transformator durch ein Ampèremeter einfach kurz schließt.

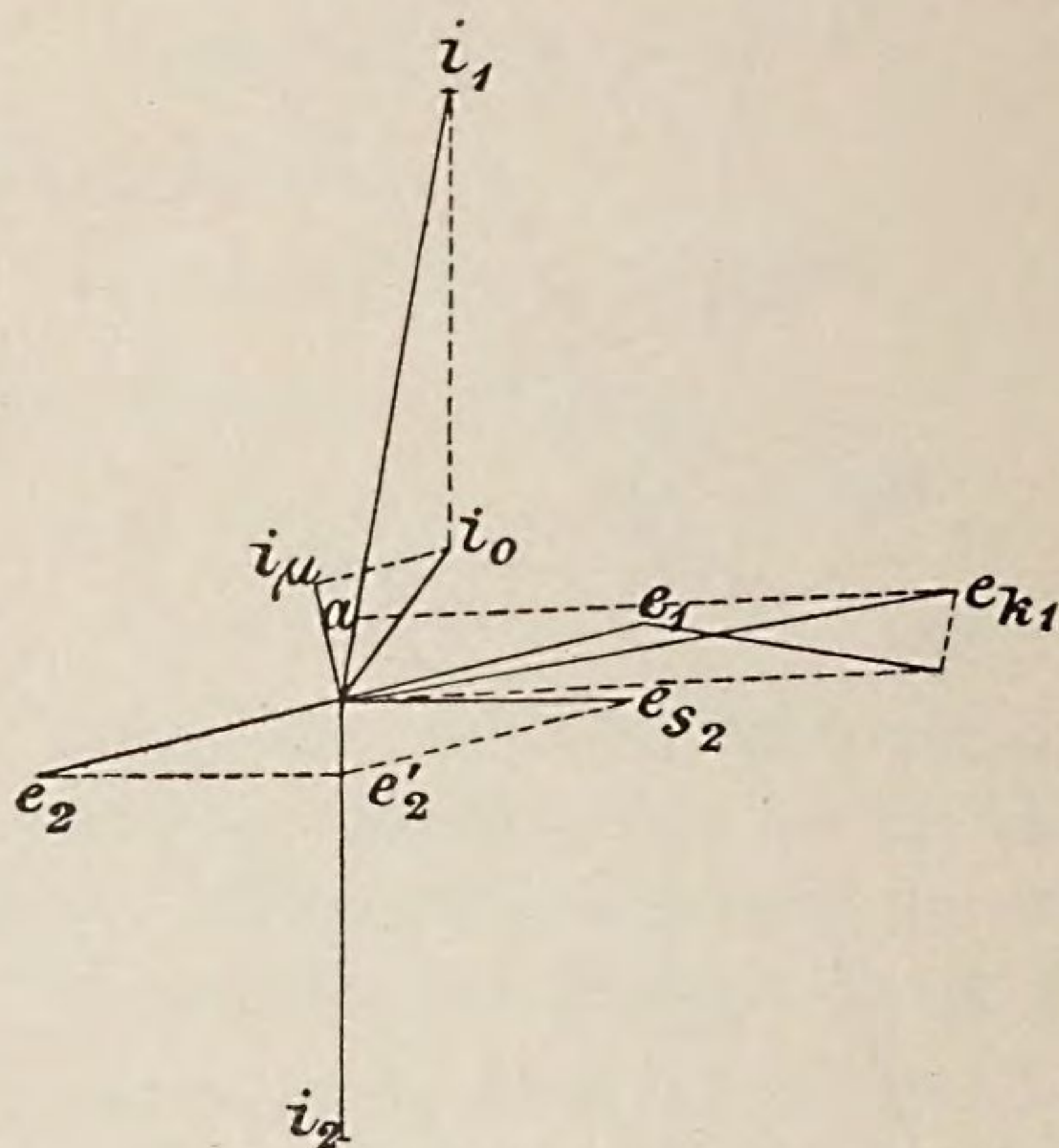


Fig. 53.

Denken wir uns, daß wir die primäre Klemmenspannung so regulieren, daß dieses Ampèremeter genau den normalen Vollbelastungsstrom anzeigt, und konstruieren wir wieder das Vektordiagramm, so erhalten wir Fig. 53. Die Bezeichnungen sind die gleichen wie in Fig. 52. Das Diagramm zeigt, daß, trotzdem die sekundäre Klemmenspannung Null ist, die Primärklemmen eine Spannung von e_{k_1} bedürfen, damit der Vollbelastungsstrom durch die Sekundärspule getrieben wird.

Wenn der ohmische Widerstand der Spulen sehr klein ist, wie das bei guten Transformatoren immer zutrifft, so kommt e_2 nahezu in die Horizontale und i_1 nahezu in die Vertikale zu liegen. Die Punkte e_1 und e_{k_1} rücken dann auch nahezu in die

Horizontale, und e_{k_1} wird nahezu gleich $e_{s_2} + e_{s_1}$. Ist nun, wie das auch meistens der Fall ist, die Anordnung beider Spulen symmetrisch, so kann man ohne großen Fehler $e_{s_2} = e_{s_1}$ annehmen und erhält somit

$$e_{k_1} = 2e_{s_2}.$$

Man kann also die EMK der Selbstinduktion in beiden Spulen leicht durch einen einfachen Versuch ermitteln. Die sekundären Klemmen werden durch ein Ampèremeter kurz geschlossen, und die primäre Klemmenspannung wird derart geregelt, daß die Ampèrebelastung im sekundären Stromkreis den normalen Wert erreicht. Der halbe zwischen den Primärklemmen beobachtete Wert der Spannung ist dann gleich der EMK der Selbstinduktion in der primären Spule. Die EMK der Selbstinduktion in der sekundären Spule ist gleich diesem Werte, dividiert durch das Umsetzungsverhältnis. Nehmen wir z. B. an, daß bei einem für die Umsetzung von 2000 auf 100 gewickelten Transformator von 10 Kwt. der oben beschriebene Versuch ergibt, daß 400 Volt Primärspannung nötig ist, um den vollen Betriebsstrom von 100 Ampère bei Kurzschluss zu erhalten, so würde $e_{s_1} = 200$ und $e_{s_2} = 10$ Volt sein. In ein für diesen Transformator gezeichnetes Vektordiagramm (Fig. 52) würde also e_{s_2} nach dem entsprechenden Maßstab mit 10 Volt einzutragen sein.

Der Versuch kann auch benützt werden, den Selbstinduktionskoeffizienten der Spulen zu bestimmen. Sei L_2 der Selbstinduktionskoeffizient der Sekundärspule, so ist

$$e_{s_2} = 2\pi \sim i_2 L_2,$$

also wenn $\sim$ beispielsweise 50 ist, so wäre in unserem Falle

$$10 = 6,28 \times 50 \times 100 \times L_2,$$

woraus

$$L_2 = 3,18 \times 10^{-4} \text{ Henry.}$$

Für die Primärspule ist $e_{s_1} = 200$ und $i_1 = 5$, somit

$$\begin{aligned} L_1 &= 400 L_2 \\ L_1 &= 0,127 \text{ Henry.} \end{aligned}$$

Es ist wohl zu beachten, daß diese Werte für den Transformator nur unter der Voraussetzung gelten, daß die Sekundärspule kurzgeschlossen ist.

Spannungsabfall. Wenn man auf die oben beschriebene Weise durch einen Versuch die durch Streuung verursachte EMK der Selbstinduktion in beiden Spulen bestimmt hat, so kann man mittels des Vektordiagrammes den Spannungsabfall bei jeder Belastung leicht finden. Dabei kann man ohne merklichen Fehler ein Annäherungsverfahren benützen, welches darauf beruht, daß man annimmt, daß Primär- und Sekundärstrom genau entgegengesetzte Phase haben. Diese Annahme ist deshalb zulässig, weil der Leerlaufstrom nur einige Prozente des Betriebsstromes beträgt,

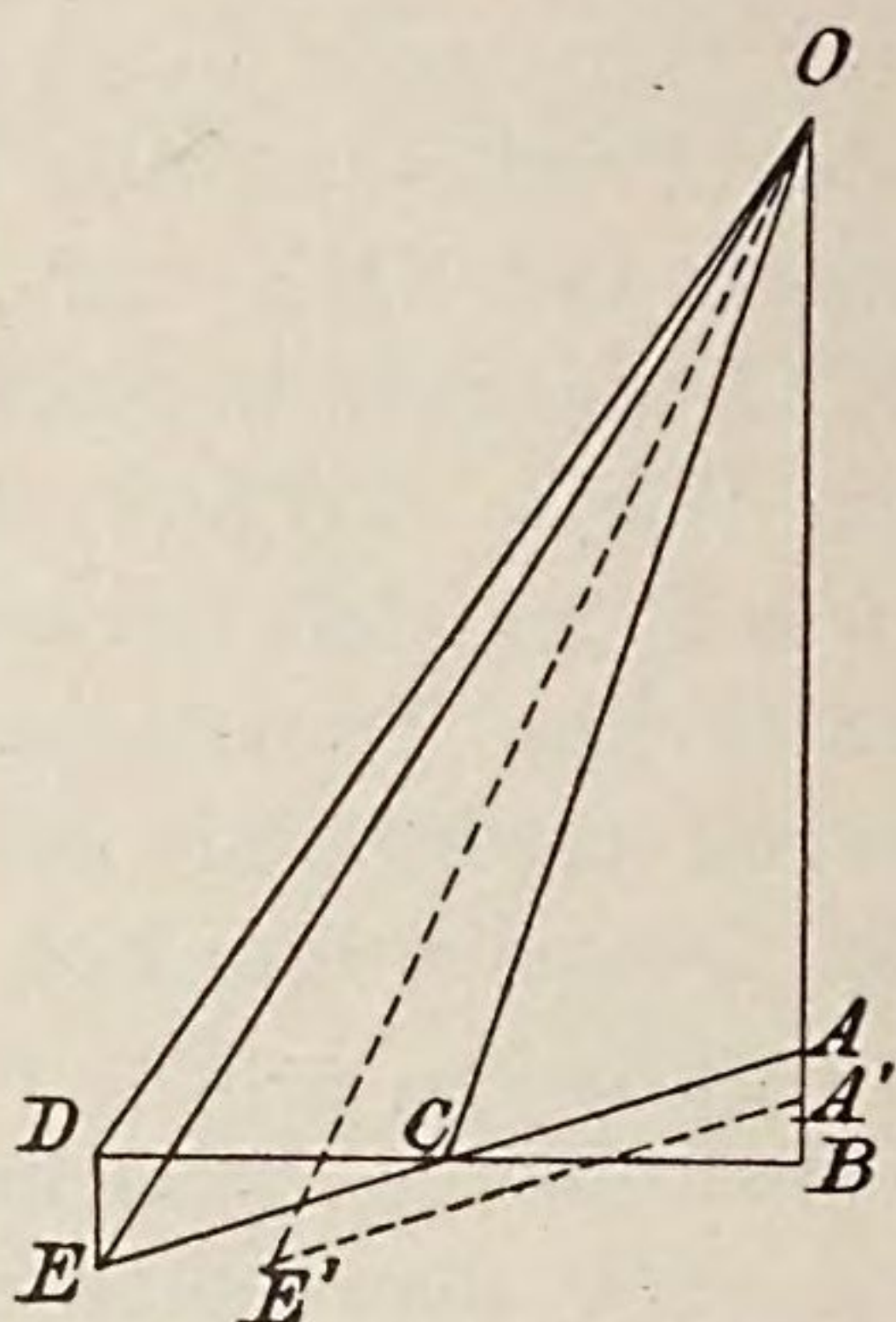


Fig. 54.

mithin die durch den Leerlaufstrom erzeugte Phasenverschiebung des Betriebsstromes ganz unbedeutend ist. Das Diagramm wird unter dieser Annahme sehr vereinfacht. In Fig. 54 bedeutet OA die sekundäre Klemmenspannung, AB den ohmischen Spannungsverlust in der Sekundärspule, $BC = e_2$, die EMK der Selbstinduktion in der Sekundärspule, mithin $OC = e_2$ die in der Sekundärspule induzierte EMK. Wenn wir uns das Umsetzungsverhältnis auf 1 reduziert denken, so ist OC auch die in der Primärspule erzeugte EMK, $CD = CB$ die EMK der Selbstinduktion in der Primärspule, und $DE = AB$ stellt mit genügender Annäherung den ohmischen Spannungsabfall in der Primärspule dar, unter der Voraussetzung, daß die Stromwärme in beiden Spulen gleich ist, wie das eine gute Konstruktion erfordert. Die Linie ACE ist also eine Gerade, und ihr Neigungswinkel ist für alle Belastungen derselbe. So würde zum Beispiel bei einer kleineren Belastung, welcher der ohmische Spannungsabfall BA' entspricht,

die sekundäre Klemmenspannung OA' und die primäre Klemmenspannung OE' betragen, wobei die Länge der Linie $A'E'$ zu AE in demselben Verhältnis steht als $A'B$ zu AB . Mit anderen Worten: die Länge der Linie $A'E'$ ist der Strombelastung direkt proportional. Wenn man nun bedenkt, daß die Strecke AB nur ungefähr ein Hundertstel von AO beträgt, so sieht man, daß man ohne merklichen Fehler die punktierte Linie $A'E'$ mit der vollen Linie AE zusammenfallen lassen und mithin die letztere Linie direkt zur Eintragung der Strombelastung verwenden kann.

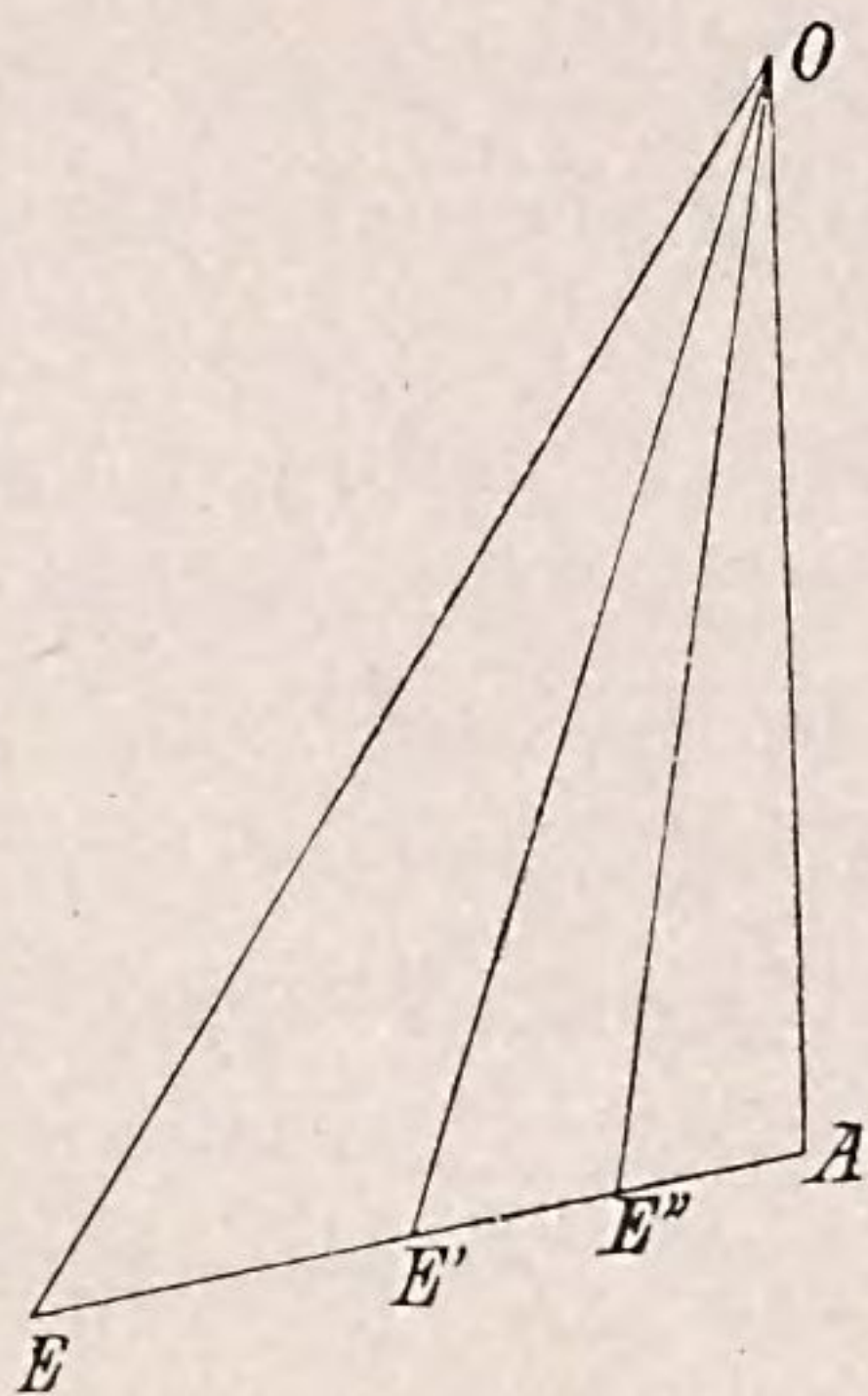


Fig. 55.

Wir fertigen uns also einen Ampèremassstab an, dessen Teilung so zu bemessen ist, daß die Strecke AE der Vollbelastung von 100 Ampère entspricht (Fig. 55). Dann sind die Klemmenspannungen durch die im Voltmassstabe gemessenen Strecken OA und OE gegeben. Bei halber Belastung ist $AE' = \frac{1}{2} AE$, und die primäre Klemmenspannung ist OE' ; bei viertel Belastung ist $AE'' = \frac{1}{4} AE$, und die primäre Klemmenspannung ist OE'' . Die sekundäre Klemmenspannung bleibt in allen Fällen die gleiche, nämlich OA . Wir können also mittels dieser Konstruktion bestimmen, wie die primäre Klemmenspannung bei verschiedener Belastung geändert werden muß, damit die sekundäre Klemmenspannung konstant bleibt. Das ist jedoch nicht jener Fall, welcher bei der praktischen Verwendung von Transformatoren eintritt. In der Regel bleibt die primäre Klemmenspannung konstant, und es handelt sich darum, zu bestimmen, wie sich die sekundäre Klemmenspannung mit der Belastung ändert. Auch diese Aufgabe läßt sich

graphisch durch eine kleine Abänderung in der obigen Konstruktion leicht lösen.

Graphische Bestimmung des Spannungsabfalles. Es wurde schon oben erwähnt, daß den verschiedenen Belastungen Dreiecke OAE , $OA'E'$ etc. entsprechen, welche alle einen Winkel (nämlich den stumpfen Winkel bei A , A' Fig. 54) gleich haben. Die längste Seite stellt die primäre Klemmenspannung und die kürzeste

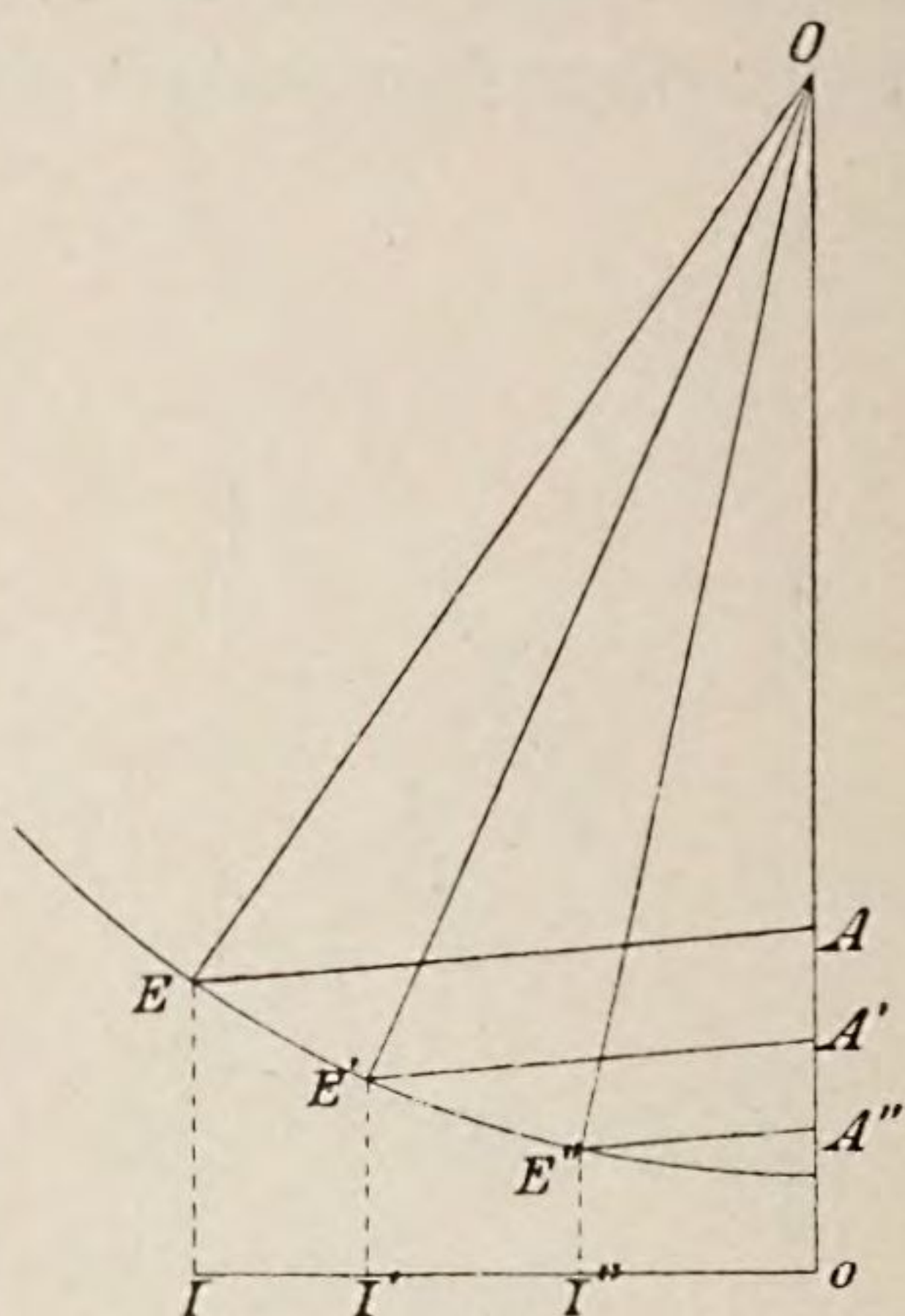


Fig. 56.

Seite die Belastung dar. Nun können wir uns jedes der Dreiecke so vergrößert oder verkleinert denken, daß die längsten Seiten in allen gleich werden, wobei die Punkte E auf einen um O beschriebenen Kreis zu liegen kommen, dessen Radius nach dem gewählten Voltmaßsstabe die konstante Spannung an den Primärklemmen darstellt. Es sei OE (Fig. 56) der Vektor dieser Spannung und OA jener der zugehörigen Sekundärspannung bei Vollbelastung. EA stellt dann wie in Fig. 55 die Belastung dar. Für eine geringere Belastung sei der Primärvektor OE' , wobei E' auf dem oben erwähnten Kreis liegen muß, wenn die Primärspannung konstant ist. Wenn wir von E' aus eine Gerade parallel zu EA ziehen, bis sie die Vertikale schneidet, so erhalten wir den Punkt A' , und OA' ist die sekundäre Klemmenspannung, welche der Belastung $A'E'$ entspricht. Der Bequemlichkeit halber können wir die Belastung auch auf einer Horizontalen von o aus auftragen.

Es entspricht dann der Belastung oI der Primärvektor OE , der Belastung oI' der Primärvektor OE' u. s. w. Die entsprechenden Werte der sekundären Klemmenspannung sind dann OA , OA' u. s. w. Wenn wir diese Konstruktion auf unser früheres Beispiel eines 10 Kwt.-Transformators anwenden und dabei annehmen, daß in jeder der beiden Spulen bei Vollbelastung 1% ohmischer Spannungsverlust stattfindet, so haben wir die EMK der Selbstinduktion 20 V und den ohmischen Spannungsverlust 2 V. Die Neigung der Linie EA ist also 1 : 10. Soll die sekundäre Klemmenspannung bei Vollbelastung 100 V sein, so muß OA dem Voltmaßstabe nach = 100 eingetragen werden. Die Strecke AE entspricht Vollbelastung; ihre Projektion oI muß also den Vollbelastungsstrom von 100 Ampère darstellen. Wenn wir uns einen Ampèremäßstab darnach machen, können wir den zu jeder Belastung gehörigen Punkt I' auf oI eintragen, und vertikal darüber den zugehörigen Punkt E' . Von da ziehen wir eine Linie parallel zu EA und finden so den Punkt A' , welcher uns die sekundäre Klemmenspannung gibt.

Diese Konstruktion ausgeführt gibt für unser Beispiel eines 10 Kwt.-Transformators mit 10% Selbstinduktion und 1% ohmischem Spannungsverlust in jeder Spule folgende Werte:

Belastung in Ampère . . .	0	25	50	75	100	200
Sekundäre Klemmenspannung	103,8	103,2	102,35	101,3	100	92

Wir haben also einen Spannungsabfall von 3,8 V von Leerlauf bis Vollbelastung. Bei Überlastung auf das Doppelte (welche der Transformator auf kurze Zeit immer noch aushalten kann) würde jedoch der Spannungsabfall noch 8 Volt mehr, also im ganzen 11,8 V betragen.

Es erübrigt noch, den Fall zu behandeln, daß die Belastung des Transformators nicht aus einem einfachen Widerstand besteht, sondern eine gewisse Selbstinduktion hat. Dieser Fall tritt ein, wenn der Transformator zur Speisung von Bogenlampen oder zum Betrieb eines Wechselstrom-Motors verwendet wird. Die Bogenlampen oder der Motor entwickeln infolge ihrer Selbstinduktion eine Gegen-EMK, deren Phase auf der Stromphase senkrecht steht und nacheilt. Die Betriebs-EMK muß also eine Komponente enthalten, welche dem Strom um 90° vorausseilt und genau so groß ist wie die EMK der Selbstinduktion. Es sei in Fig. 57 OA der Betriebsstrom und OB diejenige Komponente der EMK, welche

Arbeit leistet, OC die durch Selbstinduktion hervorgerufene Gegen-EMK. Die sekundäre Klemmenspannung des Transformators muß also OD sein und dem Strom um den Winkel φ vorseilen.

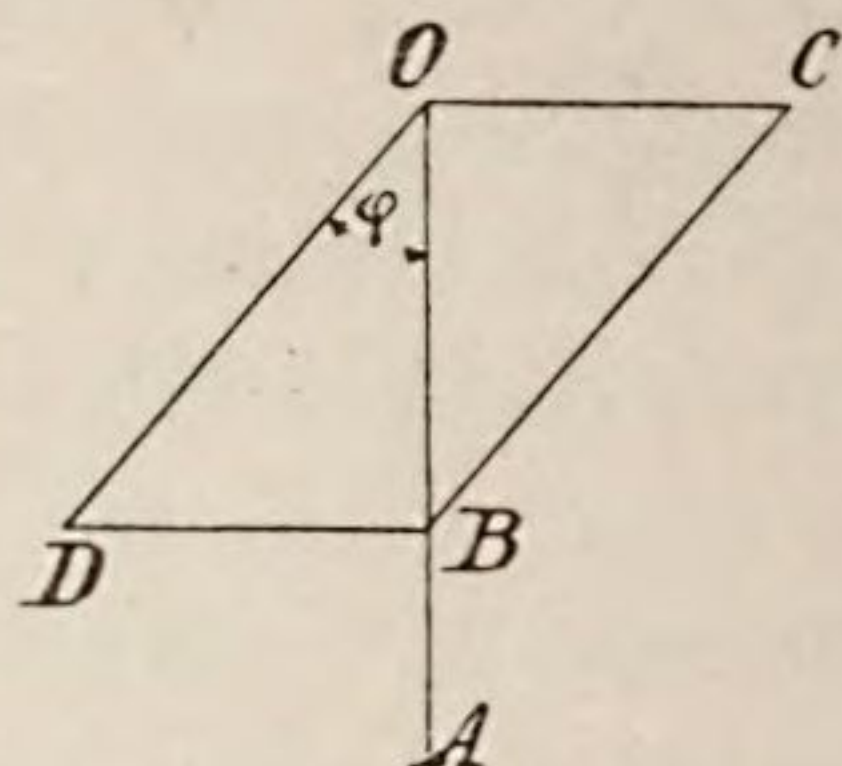


Fig. 57.

Es ist $\cos \varphi$ der Leistungsfaktor des Motors oder der Bogenlampen, welche durch den Transformator gespeist werden. Die Komponente der EMK BC heißt die wattlose Komponente, weil sie keine Arbeit leistet; die Komponente OB heißt die Watt-Komponente, weil sie die gesamte Arbeit leistet. Nun tritt oft der Fall ein, daß die stromverbrauchenden Apparate teilweise tote Widerstände und teilweise mit Selbstinduktion behaftete Widerstände sind. Es können z. B. in einer Beleuchtungsanlage Glühlampen und Bogenlampen gleichzeitig verwendet werden.

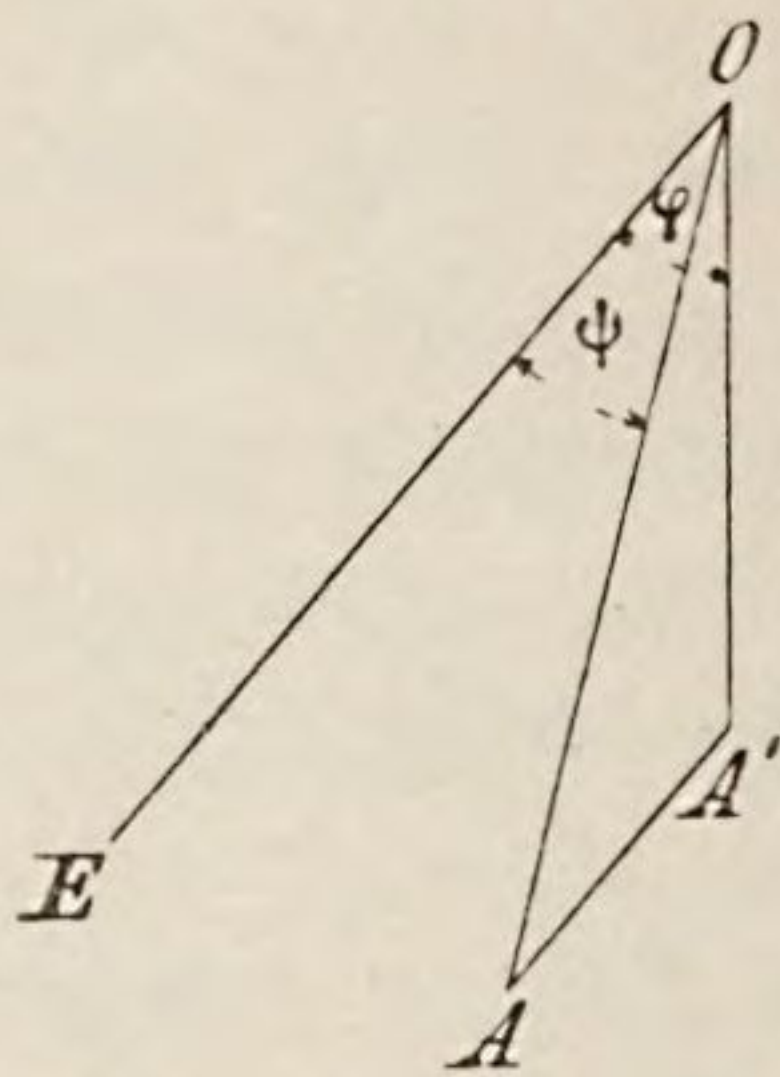


Fig. 58.

Bei einer Anlage von 100 Volt würde man die Bogenlampen in parallelen Serien von 2 oder 3 Lampen anordnen, die 100voltigen Glühlampen jedoch alle parallel. In Fig. 58 stelle OE den Vektor der sekundären Klemmenspannung dar und $\cos \varphi$ den Leistungsfaktor der Bogenlampen. Dann ist OA' die für die Bogenlampen nötige Komponente des Stromes. Die für die Glühlampen nötige Komponente ist AA' und muß natürlich mit OE parallel liegen. Der gesamte Strom ist mithin OA und der Leistungsfaktor der

ganzen Anlage ist $\cos \psi$. Es ist aus der Figur klar, daß $OA < OA' + A'A$; wenn wir also in die beiden Abzweigungen (zu den Bogenlampen und Glühlampen) je ein Ampèremeter und auch in den unverzweigten Strom ein Ampèremeter einschalten, so wird letzteres Instrument eine kleinere Stromstärke anzeigen, als die Summe der Ablesungen der beiden anderen Instrumente. Nehmen wir als Beispiel an, daß der Leistungsfaktor der Bogenlampen 71 % beträgt ($\varphi = 45^\circ$), und daß wir 5 Serien von Lampen parallel schalten, deren jede 15 Ampère gebraucht, so ist $OA' = 75$ Ampère. Nun schalten wir so viele Glühlampen ein, daß $A'A = 32$ Ampère wird. Der Gesamtstrom ist dann nicht

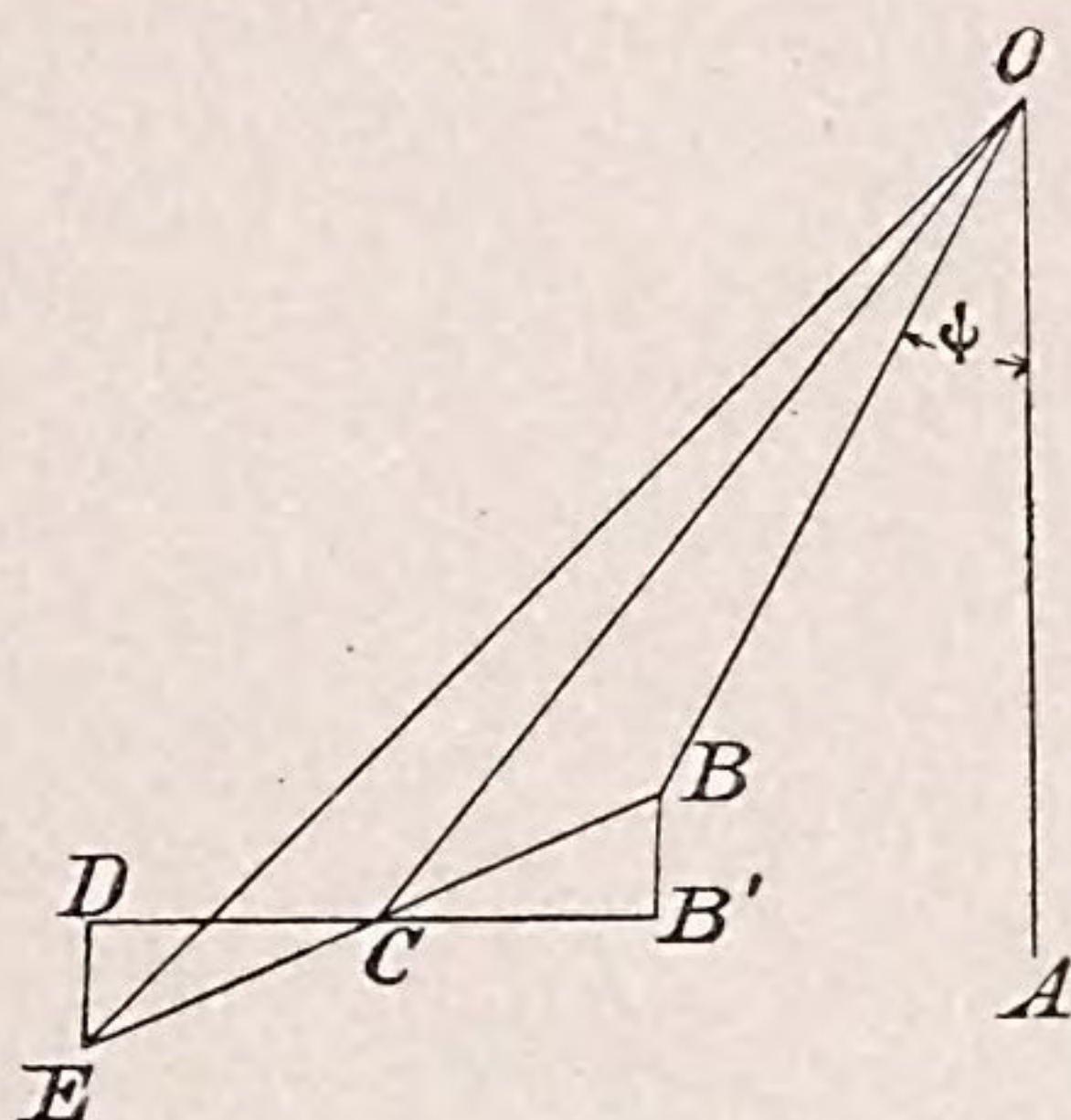


Fig. 59.

107 Ampère, sondern nur 100 Ampère, wie man sich durch eine graphische Konstruktion leicht überzeugt. Der Leistungsfaktor der gesamten Anlage ist $\cos \psi = 0,85$. Unser Transformator ist also scheinbar mit 10 Kwt. belastet, in Wirklichkeit jedoch nur mit 8,5 Kwt. Diese Verminderung der Belastung ist durch die Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung hervorgebracht worden, und es bleibt noch zu untersuchen, welchen Einfluß die Phasenverschiebung auf die sekundäre Klemmenspannung oder auf das Verhältnis zwischen primärer und sekundärer Klemmenspannung hat. Es sei in Fig. 59 OA der Gesamtstrom und OB die sekundäre Klemmenspannung. Die in der Sekundärspule induzierte EMK muß also enthalten eine Komponente OB , eine Komponente BB' zur Überwindung des ohmischen Widerstandes und eine Komponente $B'C$ zur Überwindung der Selbstinduktion. Wir erhalten somit den Vektor OC für die in der sekundären Spule induzierte EMK, welcher bei Reduktion auf gleiche Windungszahl natürlich

auch für die primäre Spule gilt. Die primäre Klemmenspannung muß auch drei Komponenten enthalten, nämlich OC , CD für die Überwindung der Selbstinduktion und DE für Überwindung des ohmischen Widerstandes. Wir erhalten somit OE als den Vektor der primären Klemmenspannung. Die Neigung der Geraden BE ist wie früher durch das Verhältnis von Widerstand und Reaktanz der Transformatorwicklung gegeben.

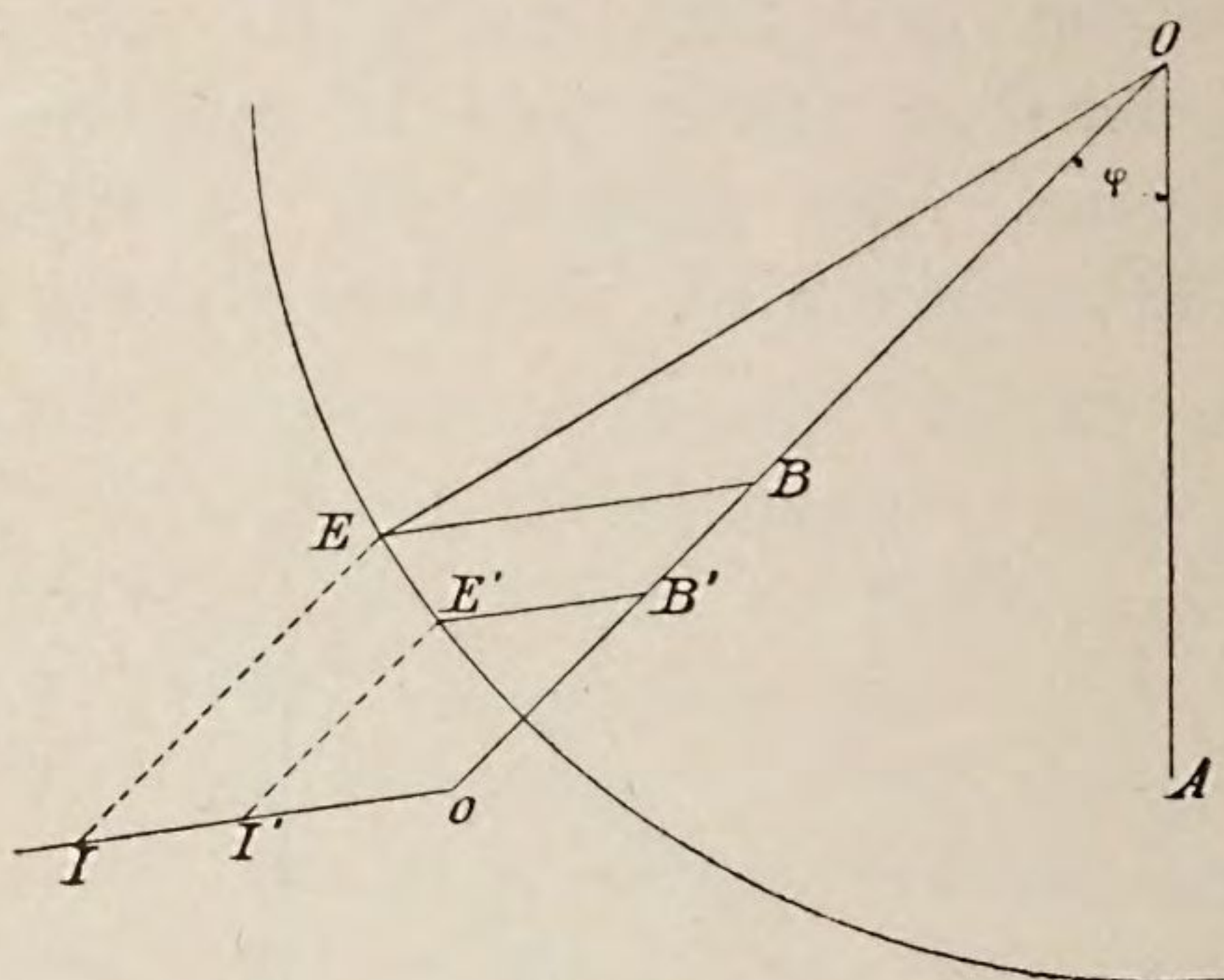


Fig. 60.

Bei gemischter Belastung ändert sich ψ mit der Anzahl der eingeschalteten Glüh- und Bogenlampen. Besteht jedoch die Belastung nur aus Bogenlampen, welche in Gruppen von 2 oder 3 Lampen in Serie zu oder abgeschaltet werden, so bleibt der Phasenwinkel, den wir in diesem Falle mit φ bezeichnen, für alle Stromstärken konstant. Die Stromstärke kann dann auf einer zu BE parallelen Geraden oI (Fig. 60) graphisch aufgetragen werden, wobei der Ampèremassstab so zu wählen ist, daß oI die Maximal-Belastung darstellt. Beschreibt man nun aus O einen durch E gehenden Kreis, so kann man die sekundäre Klemmenspannung für jede andere Belastung I' leicht finden. Man macht $I'E'$ parallel IE und $E'B'$ parallel EB . Dadurch findet man OB' als die zur Belastung I' gehörige sekundäre Klemmenspannung. Ein Vergleich von Fig. 60 mit Fig. 56 läßt sofort erkennen, daß der Spannungsabfall bei induktiver Belastung unter sonst gleichen Umständen größer ist als bei induktionsfreier Belastung.

Es wurde oben ein Beispiel über den Spannungsabfall eines 10 Kwt.-Transformators bei induktionsloser Belastung gegeben. Dabei wurde angenommen, daß die Selbstinduktion der Spulen

20% und der ohmische Widerstand 2% der sekundären Klemmenspannung bei Vollbelastung ausmachen. Die Neigung der Linie EB war also 1 : 10. Wir wollen nun genau den gleichen Transformator auf eine Batterie von Bogenlampen arbeiten lassen, welche wie oben erwähnt angeordnet sein möge. Dabei bleibt der Leistungsfaktor konstant. Derselbe sei 71 %, also $\varphi = 45^\circ$. Wenn man die graphische Konstruktion ausführt, so findet man für die sekundäre Klemmenspannung die in folgender Tabelle enthaltenen Werte. Um den Vergleich zu erleichtern, sind die früheren Werte mit angeführt.

Belastung in Ampère		0	25	50	75	100	200
Sekundäre Klemmenspannung	induktionsfrei	103,8	103,2	102,35	101,3	100	92
	induktiv						
	$\cos \varphi = 71\%$	103,8	99,5	95,2	91,0	86,8	68,0

Bei induktionsfreier Belastung hat dieser Transformator (2% Widerstand und 20% Selbstinduktion) einen Spannungsabfall von noch nicht ganz 4%; er liesse sich also für eine Glühlichtbeleuchtung allenfalls noch verwenden. Er würde sich jedoch für induktive Belastung sehr schlecht eignen, denn da beträgt der Spannungsabfall nicht weniger als 17%. Um den Transformator für Motorenbetrieb tauglich zu machen, darf die Selbstinduktion höchstens 10% der Klemmenspannung betragen, d. h. 10% der normalen Primärspannung müssen genügen, um in der kurz geschlossenen Sekundärspule den vollen Belastungsstrom zu erzeugen. Der gesamte Spannungsabfall bei 2% Widerstand beträgt dann ungefähr 9%, was bei einem Motorenbetrieb noch zulässig ist, bei Betrieb von Bogenlampen oder gemischtem Betrieb von Motoren und Glühlampen jedoch schon zu viel Schwankung in der Spannung hervorbringt. Für gemischten Betrieb soll das Produkt von Reaktanz und Strom 5% nicht übersteigen.

Die bisherige Betrachtung hat ergeben, daß bei konstanter Primärklemmenspannung ein Spannungsabfall in der Sekundärklemmenspannung erzeugt wird:

1. durch den ohmischen Widerstand beider Windungen,
2. durch die Selbstinduktion in beiden Windungen.

Ferner wurde gezeigt, daß der Spannungsabfall unter sonst gleichen Umständen desto größer ist, je größer die Selbstinduk-

tion (Reaktanz) im äußeren Stromkreise ist, d. h. je kleiner der Leistungsfaktor des durch den Transformator gespeisten Apparates ist.

Es erübrigt nun noch eine Untersuchung zu machen über den Fall, daß der vom Transformator gespeiste Apparat nicht Selbstinduktion, sondern Kapazität hat. Kapazität bedingt auch eine Verminderung des Leistungsfaktors, und es liegt daher der Gedanke nahe, daß auch in diesem Falle der Spannungsabfall um so größer ausfallen wird, je mehr der Leistungsfaktor durch die Kapazität verringert wird. Dieses ist jedoch, wie gleich gezeigt werden soll, nicht der Fall. Die Kapazität im gespeisten Apparate bewirkt nicht eine Vergrößerung, sondern eine Verminderung des Spannungsabfalles, und zwar kann die Verminderung so stark sein, daß die Sekundärklemmenspannung bei Belastung sogar höher ist, als bei Leerlauf. Um die Untersuchung so einfach als möglich zu machen, nehmen wir zunächst an, daß der von den Sekundärklemmen des Transformators gespeiste Apparat nur ohmschen Widerstand und Kapazität, nicht aber Selbstinduktion hat. Die Kapazität möge zu dem Widerstande im Nebenschluß liegen. Ist E der Maximalwert der Klemmenspannung und K die Kapazität des Kondensators in Farad, so wird der Kondensator in jeder vollen Periode mit der Elektrizitätsmenge KE Coulomb zweimal geladen und entladen, und zwar erfolgt die Ladung abwechselnd im positiven und negativen Sinne. Greifen wir den Zeitpunkt heraus, zu welchem die EMK ihren positiven Maximalwert erreicht hat und anfängt abzunehmen. In diesem Augenblicke ist der Kondensator durch den vorher in positiver Richtung eingeschlossenen Strom vollständig geladen. Der Kondensator fängt jetzt an sich zu entladen, und der Strom hat jetzt die umgekehrte, also negative, Richtung. Der Strom geht also durch Null in dem Augenblicke, in welchem die EMK ihr Maximum erreicht hat, und einen Augenblick später ist der Strom schon negativ, während die EMK noch immer einen positiven, wenn auch kleineren Wert hat. Es eilt also der Strom der EMK voraus.

Es sei in Fig. 61 E der Vektor der EMK zur Zeit t , welcher die Winkelstellung α entspricht, und e die zwischen den Kondensatorplatten herrschende Spannung. Nach Ablauf der unendlich kleinen Zeit dt ist diese Spannung um den Wert $de = \frac{d}{dt} E \sin \alpha dt$

angewachsen und die Ladung des Kondensators ist um die Elektrizitätsmenge $i dt$ vermehrt worden, wobei i der während der

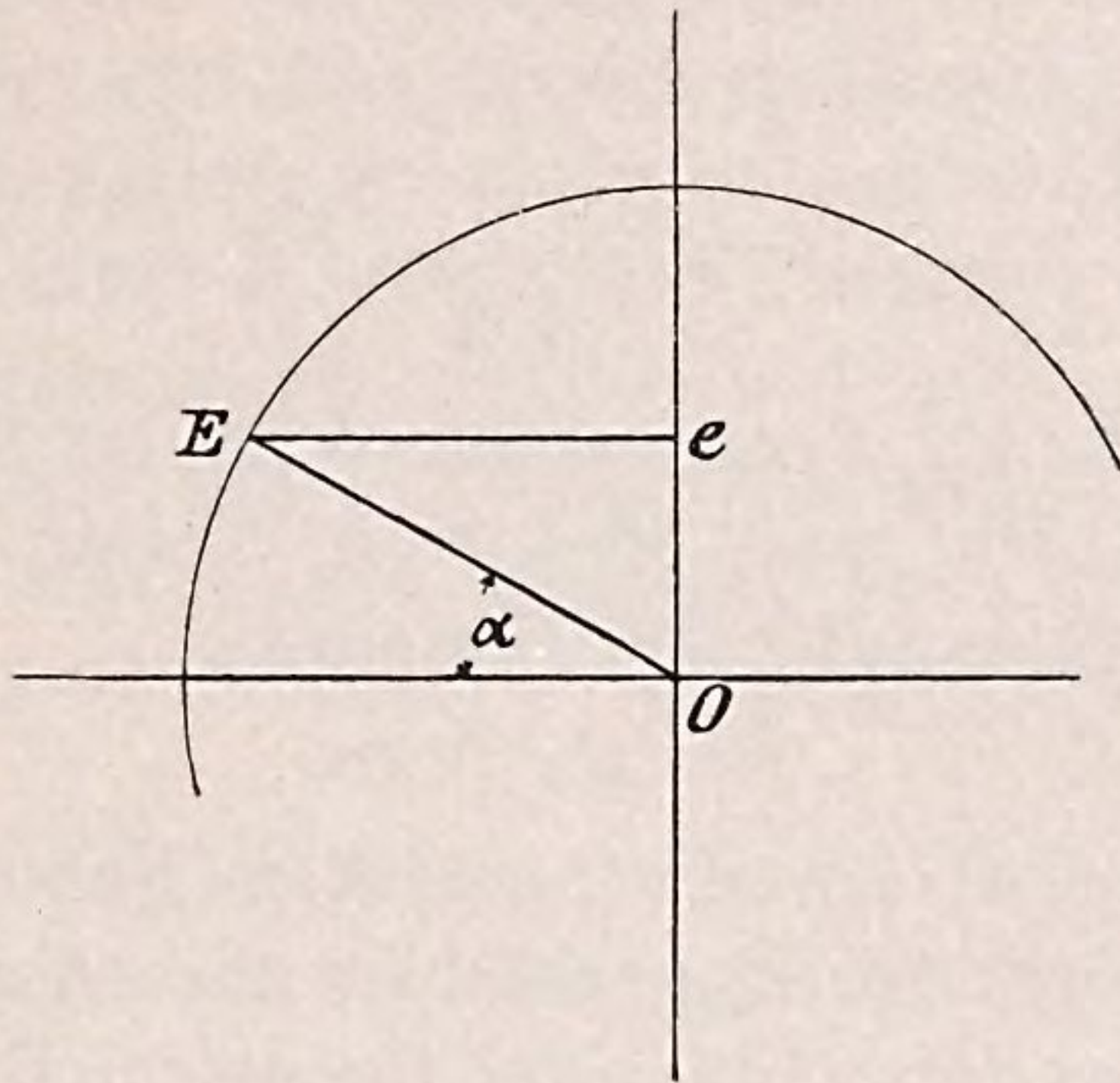


Fig. 61.

Zeit dt unter der Spannung de eingeflossene Ladestrom ist. Wir haben also

$$i dt = K de$$

$$i = K \frac{de}{dt}$$

Der Differentialquotient $\frac{de}{dt}$ ist bei sinusförmigen Stromwellen durch die Gleichung $e = E \sin \alpha$ bestimmbar. Wir haben zunächst

$$\frac{de}{dt} = E \cos \alpha \frac{d\alpha}{dt},$$

und da $d\alpha = 2\pi \infty dt$,

$$\frac{de}{dt} = E 2\pi \infty \cos \alpha$$

$$i = KE 2\pi \infty \cos \alpha.$$

Der Kondensatorstrom i erreicht seine Maxima für alle jene Werte von α , für welche $\cos \alpha = \pm 1$, also für $\alpha = 0, \pi, 2\pi$ u. s. f. Er wird Null für $\alpha = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi$ u. s. f. Andererseits ist die Spannung $e = E \sin \alpha$ ein Maximum für $\alpha = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi$ u. s. f. und Null für $\alpha = 0, \pi, 2\pi$ u. s. f. Wir finden somit, daß im Vektordiagramm der Kondensatorstrom auf der Spannung senkrecht steht und, wie

schon früher gezeigt wurde, ihr vorauselt. Der Maximalwert des Kondensatorstromes ist

$$I = K E 2 \pi \infty,$$

und sein effektiver Wert ist

$$i = \frac{K E 2 \pi \infty}{\sqrt{2}}.$$

Nun ist $e = E : \sqrt{2}$ der effektive Wert der Spannung, und wir haben somit zwischen den effektiven Werten des Kondensatorstromes und der Spannung die Beziehung

$$i = K e 2 \pi \infty;$$

dabei ist i in Ampère, e in Volt und K in Farad einzusetzen. Die gebräuchliche Einheit für Kapazität ist aber nicht das Farad, sondern das Mikrofarad (ein Millionstel Farad), und wenn wir die Kapazität des Kondensators in Mikrofarad einführen, so ist der effektive Wert des Kondensatorstromes

$$i_k = K e 2 \pi \infty 10^{-6},$$

wobei wir dem Symbol für den Strom den Index k geben, um damit auszudrücken, daß es sich nur um jene Komponente des Gesamtstromes handelt, welche in den Kondensator fließt und keine Arbeit leistet. Die Wattkomponente des Stromes, welche der Phase nach mit der Spannung übereinstimmt, bezeichnen wir

mit $i_w = \frac{e}{W}$. Der gesamte in den Apparat fließende Strom ist also

$$i = \sqrt{i_k^2 + i_w^2}.$$

Das Vektordiagramm für einen solchen Apparat ist durch Fig. 62 dargestellt. Oe ist der Vektor der effektiven Spannung,

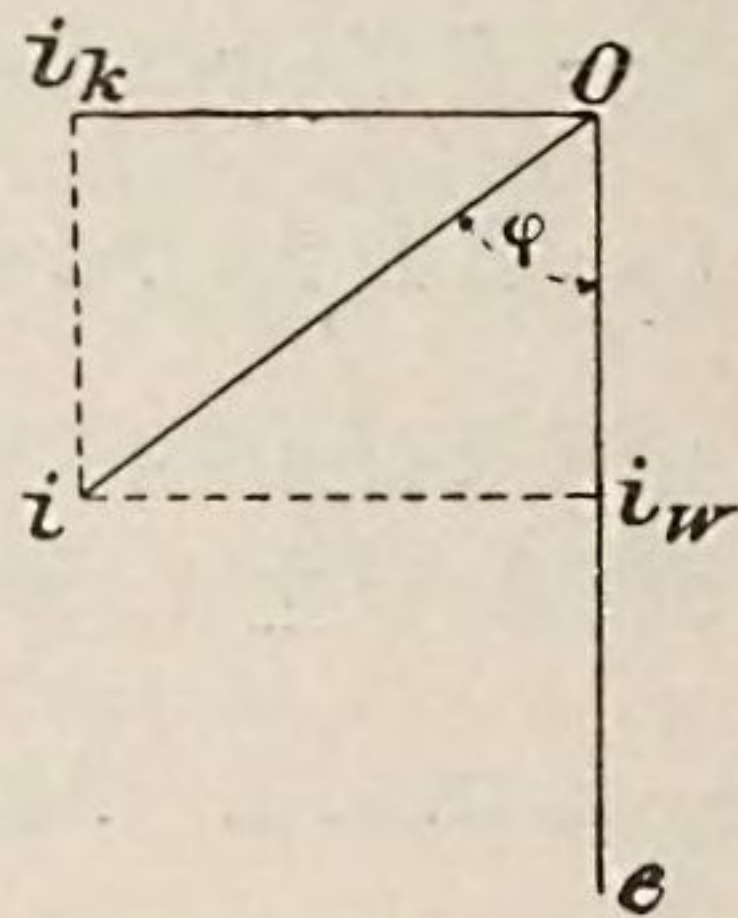


Fig. 62.

Oi_w jener des Wattstromes und Oi_k jener des Kondensatorstromes. Dann gibt der Vektor Oi die Größe und Phase des Gesamtstromes.

Das Diagramm gilt natürlich nur für den Fall, daß Widerstand und Kapazität in Parallelschaltung liegen, wie das zum Beispiel der Fall ist, wenn das eine Ende eines konzentrischen Kabels an den Transformator und das andere Ende an eine Gruppe von Glühlampen angeschlossen ist. Die beiden Leiter des Kabels bilden die Platten eines Kondensators, welcher durch den Strom i_k geladen und entladen wird. Sind alle Lampen ausgeschaltet, so ist $i_w = 0$ und i fällt mit i_k zusammen, wobei $\varphi = 90^\circ$ und der Leistungsfaktor 0 wird. In dem Maße, als Lampen eingeschaltet werden, wächst i_w , der Winkel φ wird kleiner und der Leistungsfaktor größer.

Sind nun am entfernten Ende des Kabels nicht Glühlampen, sondern Bogenlampen oder Motoren angeschlossen, so ist neben

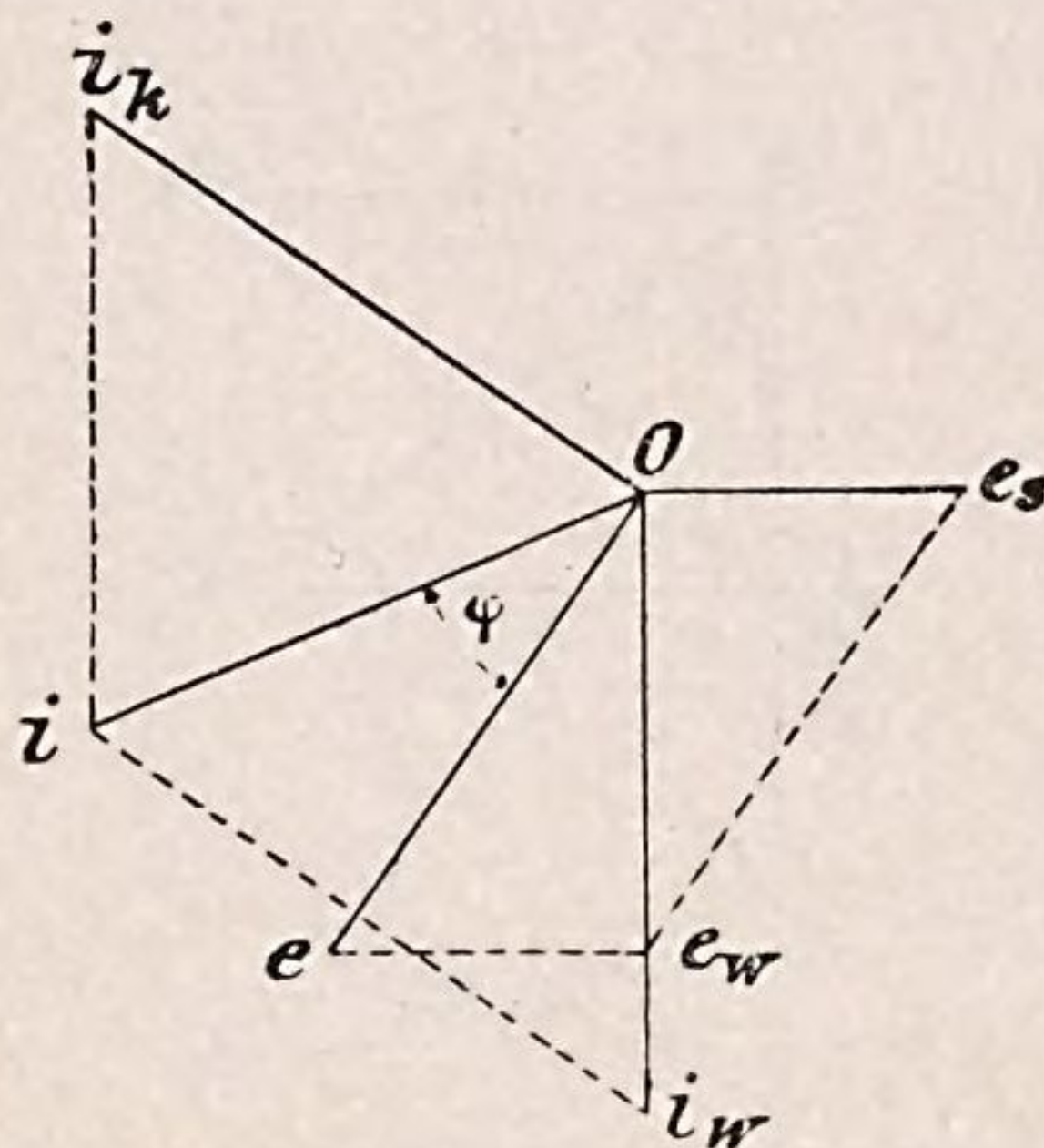


Fig. 63.

dem ohmischen Widerstand auch Selbstinduktion vorhanden. Die EMK der Selbstinduktion ist $e_s = 2\pi \sim L i_w$, und ihre Phase eilt dem Strom um 90° nach. Die betreffende Komponente der Klemmenspannung muß also um 90° voreilen. Die Wattkomponente e_w hat die gleiche Phase wie der Strom. In Fig. 63 ist i_w der durch den induktiven Widerstand fließende Strom und e_w seine Wattkomponente der EMK. Die EMK der Selbstinduktion ist e_s und mithin e die gesamte Klemmenspannung. Diese erzeugt nun einen Kondensatorstrom, welcher ihr um 90° vorauseilt; es sei das i_k . Der vom Transformator gelieferte Strom muß also die beiden Komponenten i_w und i_k enthalten. Wir finden ihn durch Konstruktion des Parallelogrammes. Sein Vektor wird der Lage und Größe nach durch die Linie Oi dargestellt. Es ist sofort klar, daß, je

nachdem Selbstinduktion oder Kapazität überwiegt, i hinter oder vor e zu liegen kommt. In der Figur sind die Verhältnisse so gewählt, daß der Strom voreilt.

Wir haben bisher angenommen, daß die Kapazität zu den übrigen Teilen des Apparates im Nebenschluß liegt. Das ist auch in der Regel der Fall; es kann jedoch auch vorkommen, daß der Stromkreis durch den Kondensator unterbrochen wird, letzterer also in Serienschaltung mit den übrigen Teilen des Apparates angeordnet ist. Eine solche Anordnung entsteht zum Beispiel bei der Anwendung eines Flüssigkeitswiderstandes zur Prüfung von Transformatoren. Ein Faß mit salzigem oder schwefelsaurem Wasser und Bleiplatten als Elektroden oder ein eiserner Trog mit alkalischer Lösung und Eisenplatten als Elektroden sind sehr bequeme Mittel, um elektrische Energie aufzubrauchen, und werden

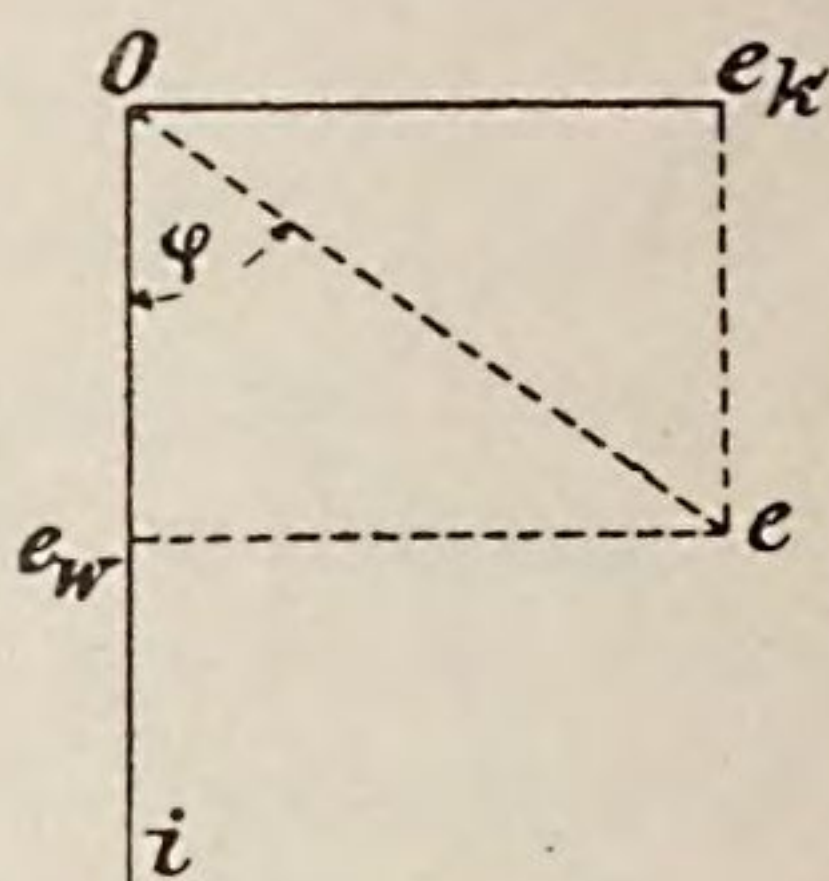


Fig. 64.

deshalb bei Belastungsproben von Transformatoren vielfach anstatt fester Widerstände verwendet. Nun bildet bekanntlich eine in eine Flüssigkeit getauchte Metallplatte einen Kondensator von ganz enormer Kapazität und wir haben somit neben dem ohmschen Widerstand der Flüssigkeit selbst die an beiden Elektroden auftretende Kapazität mit in Betracht zu ziehen. Es sei in Fig. 64 Oi der durch den Flüssigkeitswiderstand fließende Strom und Oe_k jene Komponente der EMK, welche einzig und allein zur Überwindung des ohmschen Widerstandes nötig ist. Die zur Ladung des Kondensators nötige EMK ist in absolutem Maße $e_k = i : K 2\pi \infty$ und eilt dem Strom um 90° nach. Es ist somit Oe die gesamte EMK, welche der Transformator den Elektroden zuführen muß. Es ist offenbar, daß auch in diesem Falle der Strom der EMK um den Winkel φ voreilt, und mithin der Leistungsfaktor des Flüssigkeitswiderstandes kleiner als 1 ist.

Im Vorhergehenden wurde gezeigt, wie man unter Berücksichtigung der elektrischen Konstanten eines Stromkreises für jede Belastung die Phasenverschiebung zwischen Spannung und Strom bestimmen kann. Wenn also die Klemmenspannung des Transformators und die elektrischen Konstanten desjenigen Apparates gegeben sind, welcher durch den Transformator mit Strom versehen wird, so ist dadurch der Arbeitszustand des Transformators selbst vollkommen bestimmt. Diejenigen Fälle, in welchen die Klemmenspannung dem Strome voreilt, haben wir in Bezug auf Spannungsabfall schon untersucht; es erübrigt jetzt, die Untersuchung auf jene Fälle auszudehnen, in welchen die Spannung dem Strome nacheilt, wo also der Winkel φ (Fig. 59) negativ ist.

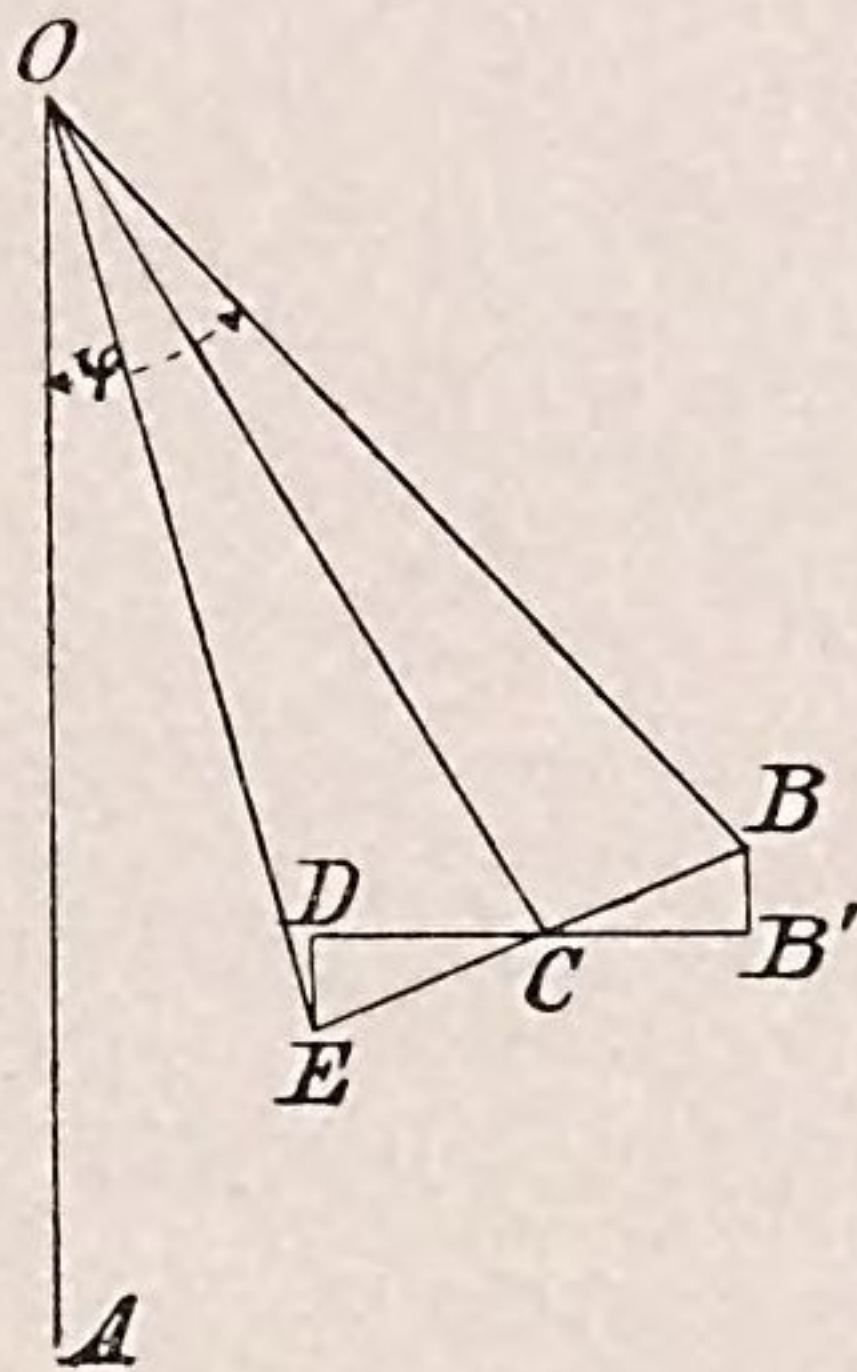


Fig. 65.

Die dortige Konstruktion kann ohne weiteres auch für diesen Fall angewendet werden. Wir haben in Fig. 65 wie früher den Stromvektor OA und die sekundäre Klemmenspannung OB . Der ohmische Spannungsverlust in der Sekundärspule sei BB' . Diese GröÙe muß mit OA gleichgerichtet sein. Die EMK der Selbstinduktion in der Sekundärspule ist $B'C$, jene in der Primärspule ist CD , und der ohmische Spannungsverlust in der Primärspule ist DE . Derselbe ist aus dem schon früher angegebenen Grunde sehr nahezu dem Strome OA gleich gerichtet. Wir erhalten somit OE als diejenige Spannung, welche den Primärklemmen zugeführt werden muß, damit der Strom OA unter der Spannung OB den Sekundärklemmen entnommen werden kann. Da die Strecke BB' sowohl als auch die Strecke $B'C$ dem Strom proportional ist, so bleibt die Neigung der Linie BE für alle Belastungen dieselbe,

und wir können mittels eines geeigneten Ampèremassstabes die sekundäre Stromstärke aus der Länge BE bestimmen, beziehungsweise bei Aufzeichnung des Diagrammes BE der Stromstärke entsprechend eintragen. Nehmen wir zunächst an, daß der Leistungsfaktor bei verschiedenen Stromstärken der gleiche bleibt, dann läßt sich die sekundäre Klemmenspannung mittels einer Konstruktion nach Fig. 60 für alle Stromstärken leicht graphisch bestimmen.

Es sei in Fig. 66 OA der Stromvektor und Oo die Richtung des Vektors der sekundären Klemmenspannung. Die Neigung der Linie oI , auf welcher wir die Belastung in Ampère abmessen, ist,

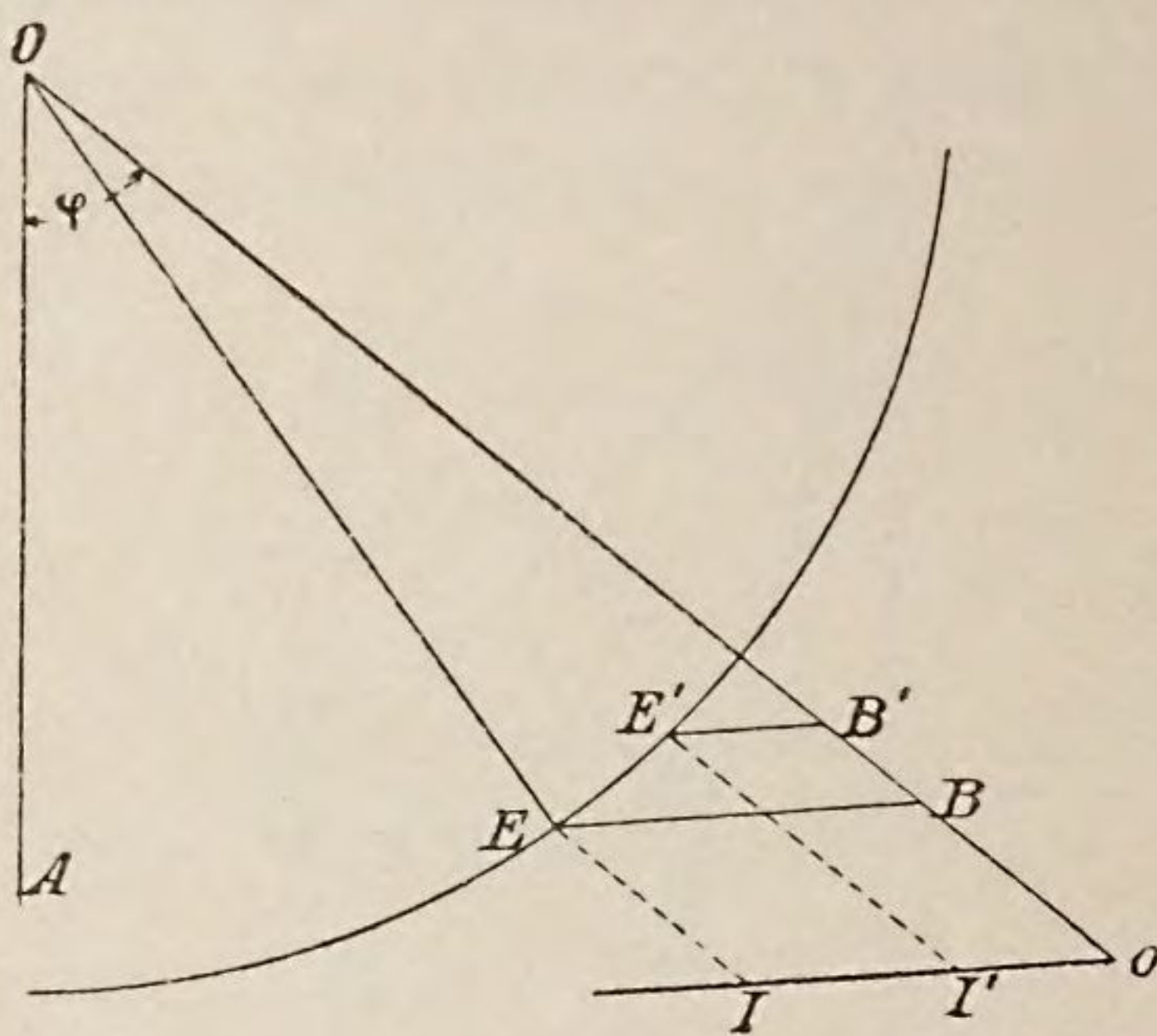


Fig. 66.

wie früher erläutert, durch das Verhältnis von Widerstand und Reaktanz gegeben. Wir beschreiben aus O als Mittelpunkt einen Kreisbogen, dessen Radius gleich der Primär-Klemmenspannung ist. Ziehen wir nun durch I eine Parallele zu oO , bis sie den Kreis schneidet, und vom Schnittpunkt E eine Parallele zu Io bis sie Oo schneidet, so finden wir den Punkt B , dessen Entfernung von O die sekundäre Klemmenspannung gibt. Für einen kleineren Strom I' finden wir in derselben Weise die Klemmenspannung OB' . Wie aus dem Diagramm ersichtlich, steigt die Klemmenspannung mit der Belastung. Es verhält sich also jetzt der Transformator ganz anders als in dem Falle, wo die Belastung induktiv war. Wir fanden dort, daß bei Belastung Spannungsabfall eintritt, während hier eine Steigerung der Spannung eintritt. Hätten wir im Diagramm den Winkel φ kleiner gewählt, so wäre, wie man sofort sieht, auch diese Steigerung kleiner ausgefallen, und für einen

gewissen Wert von φ verschwindet sie sogar gänzlich. Immerhin jedoch ist der Spannungsabfall, den man beobachtet, wenn der Transformator einen Stromkreis speist, welcher Kapazität enthält, erheblich geringer als in dem Falle, wo der Stromkreis nur ohmschen Widerstand, oder solchen und Reaktanz enthält. Aus diesem Grunde ist es unzulässig, bei der direkten Bestimmung des Spannungsabfalls als Belastung einen Flüssigkeitswiderstand zu benützen. Der so ermittelte Spannungsabfall ist immer zu klein und kann unter Umständen sogar negativ werden, das heißt, man beobachtet irrtümlicherweise nicht einen Abfall, sondern eine Zunahme der Spannung bei Belastung.

Wir haben bisher angenommen, daß der Vor- oder Nach-eilungswinkel des Stromes konstant sei, und die sekundäre Klemmenspannung als Funktion der Ampèrebelastung bestimmt. In den meisten praktisch vorkommenden Fällen ist es jedoch nur von Interesse, die Spannung bei Vollbelastung zu kennen. Die genaue Ermittlung der Spannung für teilweise Belastung hat wenig Wert, denn die Brauchbarkeit eines gegebenen Transformators muß sich doch immer nach dem größten noch möglichen Spannungsabfall richten, der eben bei Vollbelastung eintritt. Dagegen ist es wichtig, für jeden Transformator zu ermitteln, wie sich die Spannung bei Vollbelastung ändert, wenn er zur Speisung von Apparaten von verschiedenem Leistungsfaktor verwendet wird; denn darnach richtet sich die Entscheidung, ob er überhaupt für den einen oder den anderen Zweck verwendbar ist.

Das Problem ist also folgendes: Gegeben ist ein Transformator, dessen Widerstand und Reaktanz bekannt sind. Die Primärspannung ist konstant. Zu bestimmen ist die Sekundärspannung bei voller Ampèrebelastung und bei verschiedener Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung im gespeisten Apparate. Die graphische Lösung dieser Aufgabe ergibt sich aus den Figuren 59 und 65 auf sehr einfache Weise. Es ist ohne weiteres klar, daß für konstante Belastung die Länge der Linie EB immer dieselbe ist. Ihre Neigung (Verhältnis des Widerstandes zur Reaktanz) ist auch konstant. Wenn sich der Winkel φ ändert, so wandert der Punkt E auf dem Kreis, welcher die Primärspannung darstellt, und der Ort des Punktes B ist somit auch ein Kreis vom gleichen Radius, dessen Mittelpunkt relativ zu O die gleiche Lage hat, als B relativ zu E hat. Es sei in Fig. 67 die Vertikale der Stromvektor,

und OS die EMK der Selbstinduktion bei voller Stromstärke. Die Strecke So sei die EMK, welche zur Überwindung des ohmischen Widerstandes nötig ist, dann ist Oo der Strecke EB in Fig. 60 gleich und parallel, und o ist der Mittelpunkt des zweiten oben erwähnten Kreises, welcher der geometrische Ort aller Punkte B ist. Für eine positive Phasenverschiebung φ (Nacheilen des Stromes) ist die Klemmenspannung OB also kleiner, als die Spannung OE bei Leerlauf. Ist jedoch die Phasenverschiebung negativ (Voreilen des Stromes), z. B. φ_1 , so ist die Klemmenspannung OB_1 ,

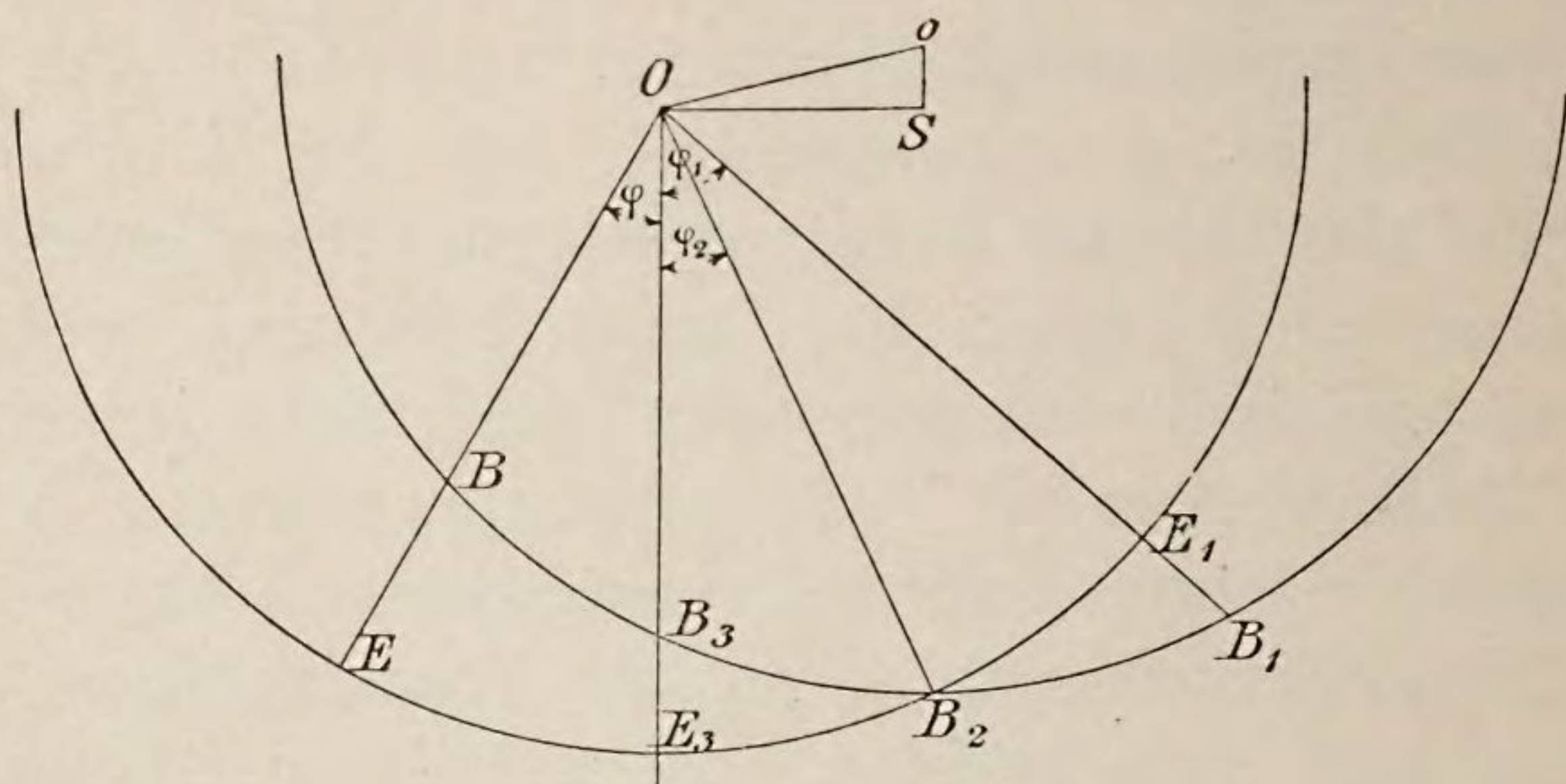


Fig. 67.

also größer als bei Leerlauf. Bei einer bestimmten negativen Phasenverschiebung φ_2 geht der Vektor der Klemmenspannung durch den Schnittpunkt beider Kreise, und es ist mithin die Klemmenspannung bei Belastung genau so groß als bei Leerlauf. Das zwischen beiden Kreisen vom Vektor abgeschnittene Stück BE gibt unmittelbar den Spannungsabfall beziehungsweise die Spannungserhöhung bei Belastung. Bei induktions- und kapazitätsloser Belastung ist $\varphi = 0$, und die Spannung ist OB_3 ; der Spannungsabfall ist also $E_3 B_3$. Das Diagramm zeigt deutlich, wie der Spannungsabfall größer wird, wenn die Phasenverschiebung infolge der Selbstinduktion im gespeisten Apparate wächst. Nach dem, was früher gesagt wurde, ist sofort klar, daß die Länge der Linie Oo die Belastung darstellt. Wenn die Belastung geändert wird, so verschiebt sich der Punkt o dementsprechend, und man kann somit die Konstruktion für jede Belastung durchführen. Das Diagramm Fig. 67 kann mithin benützt werden, um die Sekundärspannung eines gegebenen Transformators für alle möglichen Fälle vorauszubestimmen. Die so ausgeführte Bestimmung ist

einer direkten Messung aus mehreren Gründen vorzuziehen. Erstens kann eine direkte Messung nur dann ein genaues Resultat geben, wenn der zur Stromaufnahme dienende Apparat genau jene Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung erzeugt, welche in Wirklichkeit zu erwarten ist. Die Anwendung eines Flüssigkeitswiderstandes ist also im allgemeinen nicht zulässig. Feste Drahtwiderstände oder Lampen sind nicht so bequem, und ist namentlich ihre Anwendung auf eine ganz bestimmte Phasenverschiebung in dem Laboratorium einer Fabrik kaum ausführbar. Zu dem kommt noch der Übelstand, daß bei Untersuchung großer Transformatoren eine sehr bedeutende Betriebskraft notwendig ist. Man thut also besser, von einer direkten Messung des Spannungsabfalles ganz Abstand zu nehmen und die Bestimmung auf indirektem Wege mit Hilfe des Diagrammes Fig. 67 vorzunehmen.¹⁾

Der Übersichtlichkeit halber wollen wir die Untersuchungsmethode noch einmal kurz wiederholen und an einem Beispiele erläutern. Es sei ein 60 Kwt.-Transformator mit einem Umsetzungsverhältnis von 3000 zu 200 Volt zu untersuchen. Widerstand der Primärspule 0,9 Ohm; ohmscher Spannungsverlust 18 V. Widerstand der Sekundärspule 0,0036 Ohm; ohmscher Spannungsverlust 1,08 V. Wenn wir uns die Windungszahl der Primärspule auf jene der Sekundärspule reduziert denken, so ist der ohmsche Spannungsverlust $18 \cdot \frac{200}{3000} = 1,20$ V. Wir haben also zur Bestimmung der Strecke *So* in Fig. 67

Ohmscher Spannungsverlust primär	.	.	.	.	1,20
»	»	sekundär	.	.	1,08
»	»	gesamter	.	.	2,28

Jetzt schließen wir die sekundären Klemmschrauben durch ein Ampèremeter kurz und führen den Primärklemmen Strom von der richtigen Periodenzahl und solcher Spannung zu, daß das Ampèremeter genau 300 Ampère anzeigt. Die dazu aufgewendete Spannung sei 255 V, was für die reduzierte Windungszahl einer Spannung von 17 V entspricht. Wir haben also in Fig. 67 *OS* = 17 und *OE* = 200. Wir haben jetzt alle Daten zur Konstruktion des Vektordiagrammes Fig. 68. *OA* ist der Stromvektor, und auf diesem tragen wir den Leistungsfaktor cos *φ* auf. Die

¹⁾ ETZ 1895 Heft 17 S. 260.

entsprechende Lage des Spannungsvektors ist OE . Die an diesem abgelesene Spannung ist 187 Volt und so mit allen anderen Werten von $\cos \varphi$. Diese sind in der folgenden Tabelle auf ein Volt abgerundet angegeben.

60 Kwt.-Transformator 3000 : 100 Volt bei Leerlauf.

Sekundäre Klemmenspannung bei einem Strom von 300 A und verschiedenen Werten des Leistungsfaktors im gespeisten Apparat.

Leistungsfaktor in Prozenten	100	99	90	80	70	60	50
Spannung bei voreilendem Strom .	197	200	205	207	210	212	213
Spannung bei nacheilendem Strom	197	195	190	188	187	186	185

Dieser Transformator würde also bei Speisung von Glühlampen nur $1\frac{1}{2}\%$ Spannungsabfall haben, bei Speisung von Motoren oder Bogenlampen, wobei der Leistungsfaktor 70 bis 80% beträgt, ungefähr 6% Spannungsabfall aufweisen.

Aus dem Diagramm Fig. 68 lassen sich noch einige interessante Schlüsse ziehen, welche auch praktischen Wert haben. Wir beschränken uns dabei auf den Fall, daß der gespeiste Apparat

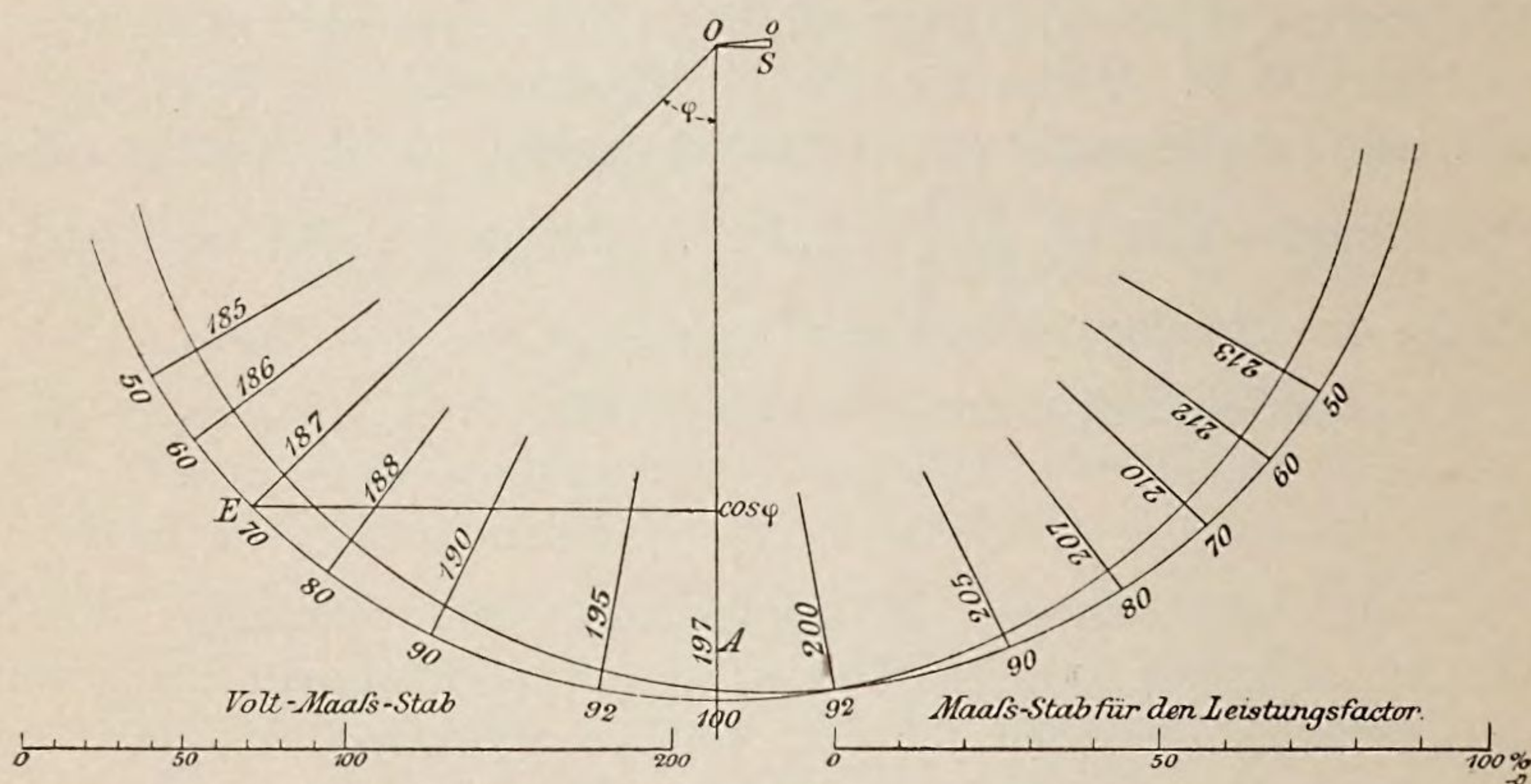


Fig. 68.

Selbstinduktion hat, also ein Nacheilen des Stromes herbeiführt. In diesem Falle brauchen wir nur die linke Hälfte des Diagrammes zu beachten.

Wenn es möglich wäre, einen Transformator zu bauen, der gar keine Streuung hat, so würde $OS = 0$ sein und der Punkt o

genau oberhalb O zu liegen kommen. Dann nähert sich der innere Kreis dem äußeren um so mehr, je weiter wir nach links gehen. Wir haben also den größten Spannungsabfall bei induktionsloser Belastung. Dieser Fall ist jedoch praktisch nicht möglich, denn man kann die Selbstinduktion im Transformator nie ganz vermeiden. Allerdings ist es, besonders bei kleiner Periodenzahl, möglich, sie beträchtlich zu vermindern. Wenn sie so weit vermindert wird, daß Reaktanz und Widerstand einander ungefähr gleich sind, so schließt Oo mit OA einen Winkel von ungefähr 45° ein, und die Entfernung zwischen den beiden Kreisen ändert sich nur wenig. Es ist also der Spannungsabfall für alle Leistungsfaktoren so ziemlich derselbe.

Meistens ist jedoch die Induktanz erheblich größer als der Widerstand, und die zwei Kreise gehen nach links hin auseinander. Der Spannungsabfall wird größer, wenn der Leistungsfaktor kleiner wird. Wird derselbe Transformator für den gleichen Zweck einmal bei niedriger und das andere Mal bei hoher Periodenzahl angewendet, so ist die Klemmenspannung im letzten Falle kleiner als im ersten. Die Summe der EMK der Selbstinduktion beider Stromkreise ist, wie schon gezeigt wurde,

$$OS = 2 \times 2\pi \sim L_2 i_2,$$

also der Periodenzahl direkt proportional. Wird letztere erhöht, so wird OS entsprechend größer, und die beiden Kreise gehen nach links hin weiter auseinander. Dazu kommt noch der Umstand, daß der Leistungsfaktor der gespeisten Apparate (Bogenlampen oder Motoren) mit steigender Periodenzahl sinkt, der Spannungsvektor sich also weiter vom Stromvektor einstellt. Beide Ursachen bewirken eine erhebliche Vergrößerung des Spannungsabfalles. Wenn es sich also darum handelt, nicht nur Glühlampen, sondern auch Bogenlampen und Motoren von Transformatoren aus zu speisen, so empfiehlt es sich, die Periodenzahl so klein zu wählen, als mit Rücksicht auf die Bogenlampen noch zulässig ist (etwa 45 bis 50 per Sekunde). Diese Periodenzahl ist im übrigen auch durch konstruktive Rücksichten in Bezug auf die Motoren geboten.

Siebentes Kapitel.

Das Dynamometer. — Das Wattmeter. — Messung von unregelmäßigen Strömen. — Andere Methoden der Energiemessung. — Prüfung von Transformatoren. — Untersuchung von Blechen.

Das Dynamometer. Die bisherige Annahme, daß alle Strom- und Spannungskurven sinusoidal verlaufen, ist zwar für die graphische und analytische Behandlung von Wechselstromproblemen sehr bequem, entspricht aber nicht den in Wirklichkeit auftretenden Erscheinungen. Es fragt sich nun, inwieweit die Annahme einer besonderen, mit der Wirklichkeit nicht übereinstimmenden Stromkurve beim Entwurf und bei der Prüfung von Wechselstromapparaten zu Fehlern Veranlassung gibt; und um diese Frage beantworten zu können, müssen wir vorerst untersuchen, ob die mit einem Ampèremeter gemessene Stärke eines Stromes von unregelmäßigem Verlauf wirklich die effektive Stromstärke ist und ob die mit einem Wattmeter bestimmte Leistung die wirkliche oder effektive Leistung ist. Was nun die erste Frage betrifft, so müssen wir uns zunächst über den Begriff der effektiven Stromstärke einigen. Nehmen wir an, wir hätten zwei genau gleiche Glühlampen, die eine sei von einem Gleichstrom und die andere von dem zu untersuchenden Wechselstrom gespeist. Wenn beide Lampen genau die gleiche Helligkeit haben, wenn also die Temperaturen der beiden Kohlenfäden und mithin die in Wärme umgesetzten Arbeitsleistungen genau gleich sind, so ist offenbar die effektive Stärke des Wechselstromes gleich jener des Gleichstromes. Da nun beide Lampen die gleiche Temperatur haben, so haben sie auch den gleichen Widerstand W und die Arbeit des Gleichstromes J_0 in der Zeit T ist $J_0^2 W T$, während die des Wechselstromes ist $\int_0^T J^2 W dt$, wobei J eine ganz beliebige Funktion der Zeit t ist, welche durch die unregelmäßige Kurvenform des Wechselstromes graphisch dargestellt wird. Wir können also die effektive Stärke des Wechselstromes durch Gleichsetzung dieser zwei Ausdrücke erhalten. Das gibt

$$J_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T J^2 dt}.$$

Es fragt sich nun, ob das Ampèremeter diesen oder einen anderen Wert anzeigt. Alle zur Messung von Wechselströmen verwendeten Instrumente beruhen entweder auf der elektrodynamischen Wirkung oder der Hitzewirkung des Stromes. In beiden Fällen ist die in jedem Augenblicke ausgeübte Wirkung dem Quadrate der in diesem Augenblicke herrschenden Stromstärke proportional. Alle auf diesem Prinzipie beruhenden Apparate werden also in Bezug auf ihre Angaben bzw. die etwa vorhandenen Messungsfehler gleichwertig sein und wir brauchen die Untersuchung nur für eine Art dieser Instrumente zu machen. Das Resultat gilt dann für alle.

Zu diesem Zwecke wählen wir das gewöhnliche Webersche Dynamometer. Die bewegliche Spule befindet sich, wie bekannt, im Felde der feststehenden Spule und ist einer ablenkenden Kraft ausgesetzt, welcher durch die Spannung einer Feder das Gleichgewicht gehalten wird. Diese ablenkende Kraft ist proportional dem Produkte der Feldstärke und der Stromstärke, und da erstere durch den Strom selbst erzeugt und diesem proportional ist, so ist die in jedem Augenblicke wirksame ablenkende Kraft dem Quadrate der in diesem Augenblicke fließenden Stromstärke proportional. Wenn wir es mit einem Gleichstrom, J_0 , zu thun haben, so ist also die ablenkende Kraft dauernd gleich $J_0^2 \frac{1}{K^2}$, wobei K eine durch die Konstruktion des Instrumentes bestimmte Konstante bedeutet. Die Gegenkraft der Feder ist ihrem Drehungswinkel D proportional, so daß die Gleichung besteht

$$D K^2 = J_0^2,$$

woraus

$$J_0 = K \sqrt{D},$$

die bekannte Formel zur Bestimmung der Stromstärke aus der Ablesung D .

Die Frage ist nun, ob die gleiche Formel zur Bestimmung der effektiven Stromstärke bei einem Wechselstrom von ganz beliebiger Kurvenform ohne Fehler verwendet werden kann. Denken wir uns den Strom durch die Ordinaten einer Kurve als Funktion der Zeit dargestellt. Wenn wir eine zweite Kurve zeichnen, deren Ordinaten die Quadrate der ersten darstellen, so

bedeutet die von der zweiten Kurve mit der Abscissenachse eingeschlossene Fläche den Wert $\int_0^T J^2 dt$ und die Höhe eines Rechteckes von gleicher Basis und Fläche stellt das Quadrat der effektiven Stromstärke dar. Auf die bewegliche Spule des Dynamometers wirkt dauernd die durch Spannung der Feder erzeugte Kraft und außerdem noch die dynamische Kraft des Stromes, welche zwischen 0 und einem Maximum schwankt, und dabei immer eine der Federkraft entgegengesetzte Richtung hat. Nennen wir J_t den zur Zeit t fließenden Strom, so ist $D K^2 - J_t^2$ die zur Zeit t auf die Drähte der Spule ausgeübte Kraft. Die der Spule in diesem Augenblicke mitgeteilte Beschleunigung ist $\frac{D K^2 - J_t^2}{m}$,

wenn wir mit m die auf den Angriffspunkt der Kraft reduzierte Masse der Spule bezeichnen. Wäre diese Masse klein genug, so würde diese Beschleunigung, welche bald positiv, bald negativ ist, der Spule auch in der That eine sichtliche hin- und hergehende Bewegung ertheilen und es würde also die Spule zu jedem Zeitpunkt eine bestimmte Bewegungsgeschwindigkeit haben, welche sich aus der Formel

$$v = \int_0^t \frac{(D K^2 - J_t^2)}{m} dt$$

berechnen läßt, vorausgesetzt daß die Geschwindigkeit zur Zeit $t=0$ auch 0 ist.

Nun ist aber die Masse der beweglichen Spule im Vergleich mit den auftretenden Kräften so groß und die Zeit einer Periode so klein, daß die Spule überhaupt nicht in sichtliche Bewegung gerät, sondern sich durch entsprechende Anspannung der Feder genau auf ihre Mittellage einstellen läßt. Das ist übrigens auch die notwendige Bedingung einer genauen Messung. Es muß also, um mit dem Instrumente überhaupt messen zu können, v unendlich klein, d. h. gleich Null sein. Das gibt aber

$$\int_0^T \frac{(D K^2 - J_t^2)}{m} dt = 0$$

und somit

$$D K^2 \int_0^T dt = \int_0^T J_t^2 dt$$

$$D K^2 = \frac{1}{T} \int_0^T J_t^2 dt.$$

Der Ausdruck auf der rechten Seite dieser Gleichung ist nichts anderes, als die Höhe des früher erwähnten Rechteckes, das heißt das Quadrat der effektiven Stromstärke J_0 , und es ist mithin der Beweis geliefert, daß das Dynamometer die effektive Stromstärke ohne Fehler anzeigt, welches auch die Form der Stromkurve sein möge. Die bei der Aichung des Instrumentes mit Gleichstrom bestimmte Konstante gilt mithin auch für Wechselstrom jeder Periodenzahl und Kurvenform.

Es ist hier zu bemerken, daß die allgemeine Anwendung dieses Satzes auf andere Meßinstrumente nur zulässig ist, wenn in diesen Instrumenten die dynamische Wirkung des Stromes in jedem Augenblicke dem Quadrate der Stromstärke genau proportional ist. Enthält ein Meßinstrument jedoch Eisen, so ist diese Proportionalität nicht von vornherein gesichert; es kann vielmehr der Fall eintreten, daß durch Hysteresis und Wirbelströme im Eisen diese Proportionalität gestört wird, und dann muß das Instrument für jede Periodenzahl und Kurvenform besonders geaicht werden.

Das Wattmeter. Es erübrigt noch, zu ermitteln, ob das Dynamometer, als Wattmeter benützt, auch bei unregelmäßig verlaufenden Wechselströmen die effektive Leistung genau angibt.

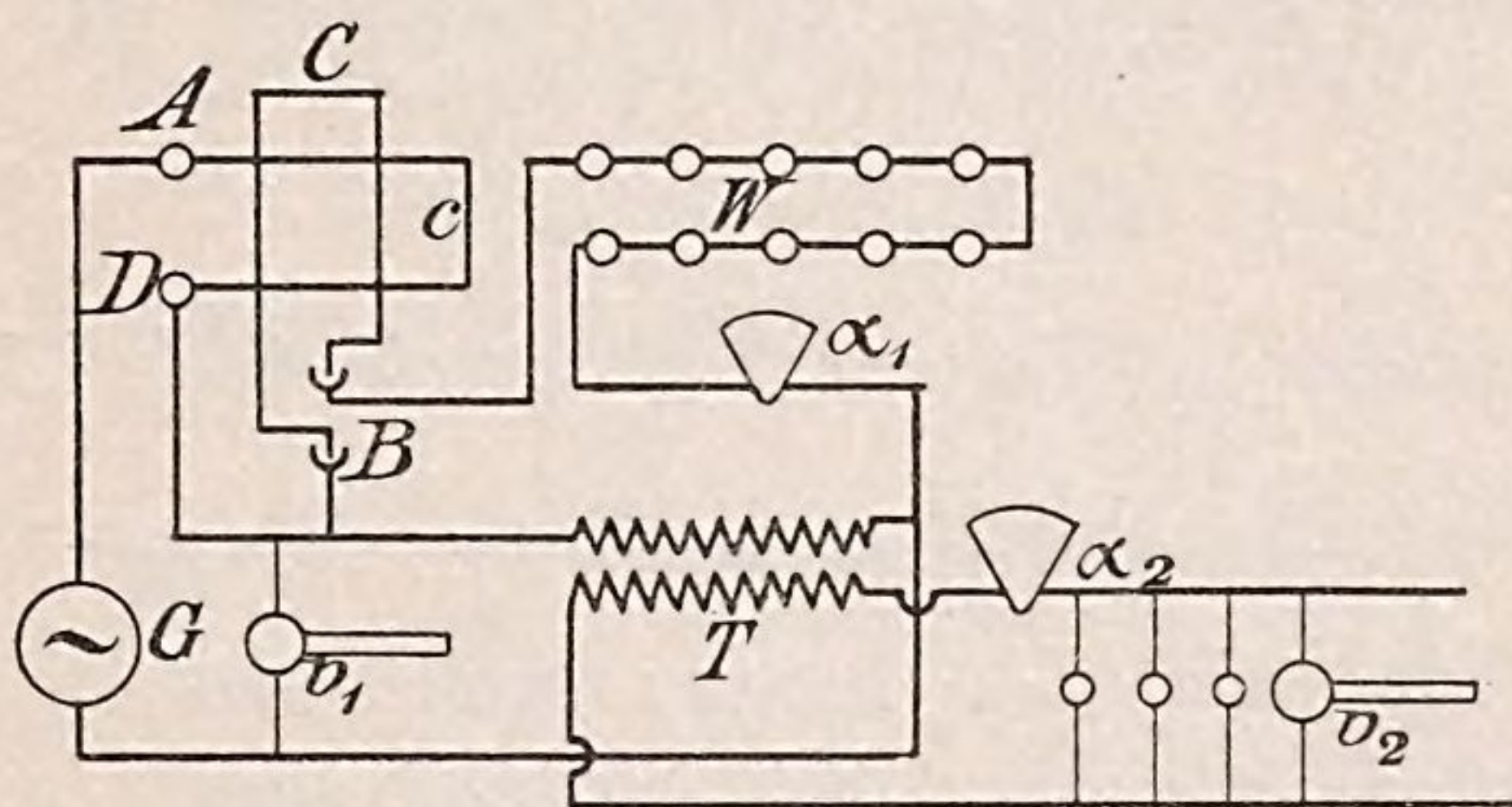


Fig. 69.

Die Anordnung eines Dynamometers zur Energie-Messung ist in Fig. 69 dargestellt. C ist die bewegliche und c die feste Spule

des Dynamometers. G ist die Stromquelle und T der Apparat, welcher den Strom empfängt; in diesem Falle ein Transformator.

Dynamometer gewöhnlicher Bauart haben bloß zwei Klemmen, A und B (oder drei, wenn die feststehende Spule in zwei Teilen angeordnet ist, behufs Vergrößerung des Meßbereiches). Soll das Instrument jedoch zu Wattmessungen benützt werden, so muß die Verbindung zwischen fester und beweglicher Spule noch eine weitere Klemme, D , erhalten. Der Strom, dessen Energie man bestimmen will, wird dann durch die feste Spule geleitet, und zwischen die Klemme B der beweglichen Spule und die Rückleitung wird ein möglichst induktionsloser Widerstand, W , geschaltet, welcher am besten aus hin und her (nicht spiralförmig) gewickeltem Platinoid-Draht oder Streifen, oder auch aus einer Serie von Glühlampen besteht. In diesen Stromkreis möge auch ein Ampèremeter, α_1 , eingeschaltet sein, jedoch ist dasselbe nicht absolut notwendig.

Wenn der Widerstand W sehr groß ist, so kann man ohne erheblichen Fehler annehmen, daß der durch α_1 fließende Strom der Phase nach mit der zwischen den Klemmen des Generators herrschenden EMK, die im Voltmeter v_1 angezeigt wird, übereinstimmt. Mit andern Worten: der durch die bewegliche Spule des Wattmeters fließende Strom hat keine Phasenverschiebung. Der Strom, welcher durch die feste Spule fließt, hat jedoch im allgemeinen Phasenverschiebung und zwar um so mehr, je größer die Selbstinduktion des Apparates T ist. Es sei I der Primärstrom des Transformators (mit Maximalwert I_m) und i der Nebenschlußstrom (mit Maximalwert i_m), so ist bei sinusoidalem Verlauf das auf die bewegliche Spule wirkende Drehmoment dem Ausdrücke

$$I_m \sin(\alpha - \varphi) i_m \sin \alpha$$

proportional, wobei α die zur Zeit herrschende Phase der EMK und φ die Phasenverschiebung in c ist. Da $i_m = \frac{e_m}{W}$ (wobei wir in W den Widerstand der festen Spule, des Ampèremeters α_1 und der Drahtverbindungen mit einschließen), so kann obiger Ausdruck auch in der Form geschrieben werden

$$I_m \sin(\alpha - \varphi) \frac{e_m}{W} \sin \alpha.$$

Wird nun durch Drehung des Knopfes die Feder des Dynamometers gespannt, so wird der beweglichen Spule ein Drehmoment DK^2 erteilt, wobei wie früher D die Winkelablesung und K die durch Aichung mit Gleichstrom ermittelte Konstante des Instrumentes ist. Ist m die auf den Angriffspunkt der Kräfte reduzierte Masse der Spule, so ist die ihr erteilte Beschleunigung

$$\frac{DK^2 - I_m \frac{e_m}{W} \sin(\alpha - \varphi) \sin \alpha}{m}$$

und die nach der Zeit t erlangte Geschwindigkeit ist

$$v = \frac{1}{m} \int_0^t \left(DK^2 - I_m \frac{e_m}{W} \sin(\alpha - \varphi) \sin \alpha \right) dt,$$

wobei wir voraussetzen, daß zur Zeit $t = 0$ die Geschwindigkeit auch 0 ist. Nun ist aber die Masse der Spule im Vergleich zu den auf sie wirkenden Kräften sehr groß und ferner finden die Änderungen in der Größe und Richtung dieser Kräfte so rasch statt, daß die Spule ihnen überhaupt nicht folgen kann, sondern sich ruhig einstellt. Es ist also $v = 0$, was nur der Fall sein kann, wenn

$$t DK^2 = \int_0^t I_m \frac{e_m}{W} \sin(\alpha - \varphi) \sin \alpha dt$$

oder, wenn wir die Integration über die Zeit einer ganzen Periode ausdehnen

$$DK^2 = \frac{I_m e_m}{W T} \int_0^T \sin(\alpha - \varphi) \sin \alpha dt,$$

oder mit einer kleinen Umformung

$$DK^2 = \frac{I_m e_m}{W} \int_0^{2\pi} \sin(\alpha - \varphi) \sin \alpha \frac{d\alpha}{2\pi}.$$

Die Auflösung des Integrales ergibt aber $\frac{\cos \varphi}{2}$ und wir erhalten somit

$$DK^2 = \frac{1}{W} \frac{I_m e_m}{2} \cos \varphi$$

oder mit Einführung der effektiven anstatt der Maximalwerte

$$D K^2 = \frac{1}{W} I e \cos \varphi.$$

Nun ist aber $I e \cos \varphi$ nach den früheren Ausführungen (siehe S. 59) nichts anderes als die Energie, welche dem Apparate zugeführt wird, und wir sehen somit, daß dieselbe durch das Produkt $W D K^2$ dargestellt wird, wobei bedeutet

D die Ablesung am Dynamometer (oder in diesem Falle am Wattmeter) in Graden,

K die bei Aichung mit Gleichstrom bestimmte Konstante, so daß $K \sqrt{D} = i$,

W der gesammte Widerstand im Nebenschluß in Ohm.

Man kann nun das Instrument in der in Fig. 69 gezeichneten Weise als Wattmeter benützen und nebenbei noch zwei andere Beobachtungen machen, indem man es zur Strommessung als Dynamometer schaltet, d. h. die Klemmen A und B , nicht aber D

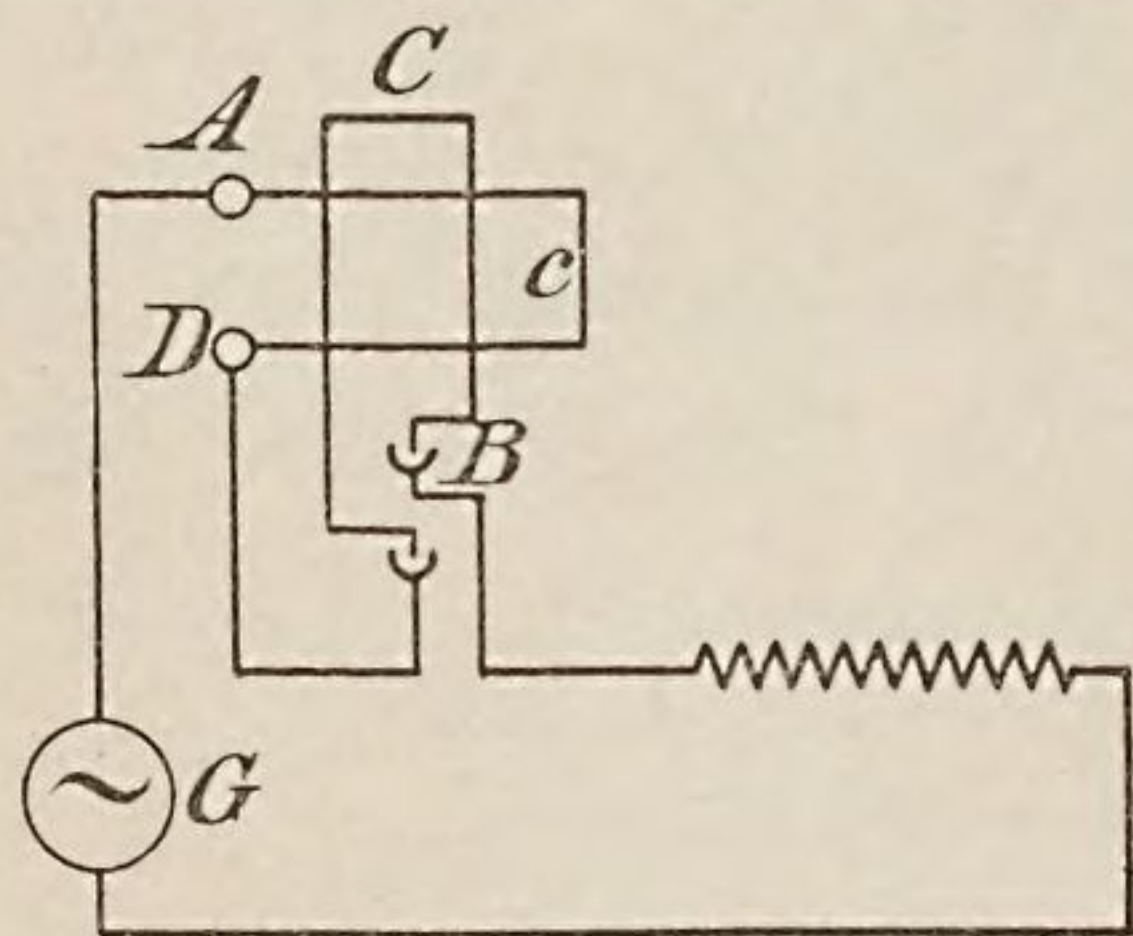


Fig. 70.

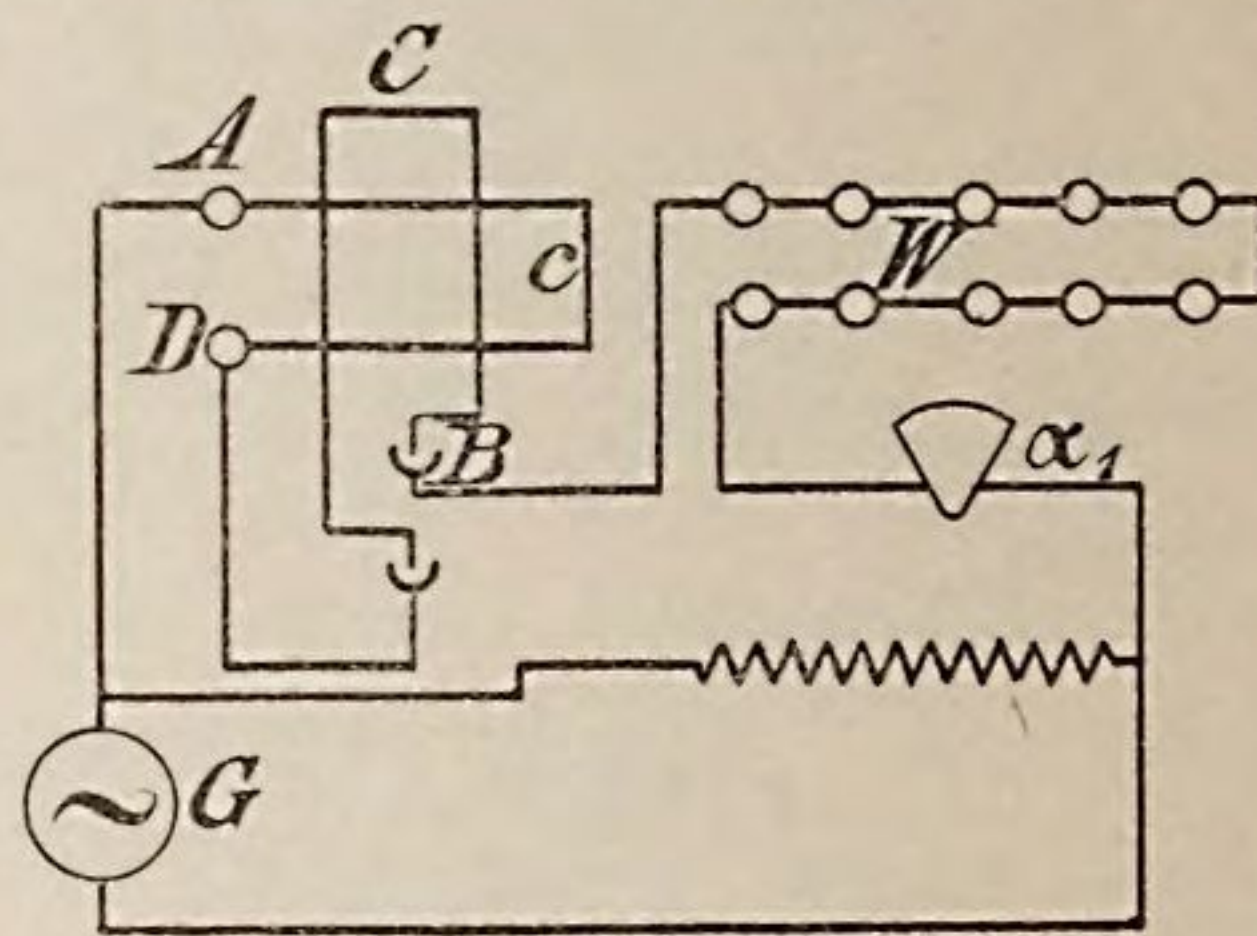


Fig. 71.

gebraucht. Man ändert die Schaltung so, daß man zuerst den Hauptstrom I mißt (Fig. 70) und dann den Nebenstrom $\frac{e}{W}$ (Fig. 71).

Dabei setzen wir voraus, daß die in Schaltung Fig. 70 durch die bewegliche Spule hinzugekommene Selbstinduktion gegenüber der Selbstinduktion des Apparates verschwindend klein ist und daß der Widerstandszuwachs bei Schaltung Fig. 71 gegen den Vorschaltwiderstand W auch verschwindend klein ist; mit andern Worten, daß im Meßinstrumente selbst weder Energieverlust durch ohmschen Widerstand, noch Phasenverschiebung durch Selbstinduktion hervorgerufen wird. Man mißt dann in der Schaltung Fig. 70 den Hauptstrom I , wobei die Ablesung D_1 sein möge,

$$K \sqrt{D_1} = I,$$

und in der Schaltung Fig. 71 den Nebenstrom $\frac{e}{W}$, wobei die Ablesung D_2 sein möge,

$$K \sqrt{D_2} = \frac{e}{W}.$$

Aus diesen beiden Gleichungen erhält man durch Multiplikation

$$K^2 \sqrt{D_1 D_2} = I \frac{e}{W}.$$

Die frühere Gleichung

$$K^2 D = I \frac{e}{W} \cos \varphi$$

damit verbunden, gibt

$$\cos \varphi = \frac{D}{\sqrt{D_1 D_2}}.$$

Man kann also durch drei Messungen mit demselben Instrumente (einmal als Wattmeter und zweimal als Dynamometer benutzt) die Phasenverschiebung bestimmen, wobei blofs die drei Winkelablesungen maßgebend sind. Die Konstante des Instrumentes und den Vorschaltwiderstand braucht man nicht zu kennen.

Messung von unregelmäßigen Strömen. Wir haben bisher angenommen, daß Strom und Spannung nach dem Sinusgesetz verlaufen. Es ist jedoch leicht einzusehen, daß die Energiemessung mittels des Wattmeters (Schaltung Fig. 69) auch dann vollkommen genaue Resultate gibt, wenn Strom und Spannung nach ganz beliebigen Gesetzen verlaufen. Die in der Zeit T vom Strome geleistete Arbeit ist

$$\int_0^T I e dt = W \int_0^T I i dt,$$

wobei sowohl der Hauptstrom I als auch der Strom i im Nebenschluß irgendwelche beliebige Funktionen der Zeit sein können. Das der Spule bei der Torsion D erteilte Drehmoment ist $DK^2 - Ii$. Dieses ändert sich von Augenblick zu Augenblick und würde bei genügend kleiner Periodenzahl (T groß) und kleiner Masse der Spule ein Hin- und Herschwingen derselben hervorrufen. Die Masse der Spule ist jedoch genügend groß und T genügend klein, daß keine sichtbare Bewegung der Spule eintritt. Das Integral

der Beschleunigung über die Zeit einer Periode genommen, muß daher 0 sein, d. h.

$$\int_0^T \left(\frac{D K^2 - I i}{m} \right) dt = 0$$

$$T D K^2 = \int_0^T I i dt$$

$$W D K^2 = \frac{W}{T} \int_0^T I i dt.$$

Nun ist $W \int_0^T I i dt$, wie oben ausgeführt, die in der Zeit T geleistete Arbeit, mithin ist $\frac{W}{T} \int_0^T I i dt$ die Energie und wir finden somit, daß die mittels des Wattmeters gemessene Energie

$$W D K^2 = P$$

wirklich die in dem Wechselstrom enthaltene Energie ist, was immer die Form der Strom- und Spannungskurven sein möge.

Aus dieser Formel sieht man, daß zur Bestimmung der Energie der Widerstand W genau bekannt sein muß. Besteht derselbe aus Platinoid oder einem ähnlichen Metall mit sehr kleinem Temperaturkoeffizienten, so verursacht diese Bedingung keine Schwierigkeit. Wird jedoch eine Serie von Glühlampen als Widerstand verwendet, so ist letzterer nicht konstant, sondern hängt von e ab. Man kann nun zur Bestimmung von W auf zwei Arten verfahren. Nach der einen Methode beobachtet man gleichzeitig die Ablenkung D am Wattmeter, den Strom i am Ampèremeter α_1 , und die Spannung am Voltmeter v_1 . Die zwei letzten Beobachtungen geben $W = e : i$, so daß die Energie durch die Formel

$$P = \frac{e}{i} D K^2$$

ausgedrückt wird. Nun ist die gleichzeitige Beobachtung von drei Größen etwas umständlich, und um sich die Arbeit zu erleichtern, kann man die zweite Methode verwenden, nach welcher man den Lampenwiderstand vorher aicht, indem man die Werte von W als Funktion von e bestimmt, und in einer Kurve aufträgt. Dann

braucht man bei der Energiemessung nur D und e abzulesen, und den zu e gehörigen Wert von W aus der Kurve zu entnehmen. Die Aichung kann mit Gleichstrom geschehen und das Ampèremeter α_1 kann dann entfernt oder kurz geschlossen werden, wodurch auch die Bedingung der Induktionslosigkeit des Nebenschlusses leichter erfüllbar wird.

Bei der Schaltung Fig. 69 fließt durch das Wattmeter nicht nur die Energie, welche dem Transformator T zugeführt wird, sondern auch die im Nebenschluß aufgewendete Energie. Diese Schaltung ist also anzuwenden, wenn es sich darum handelt, die gesamte von dem Generator gelieferte Energie zu messen. Will man jedoch bloß die Energie messen, welche dem Transformator

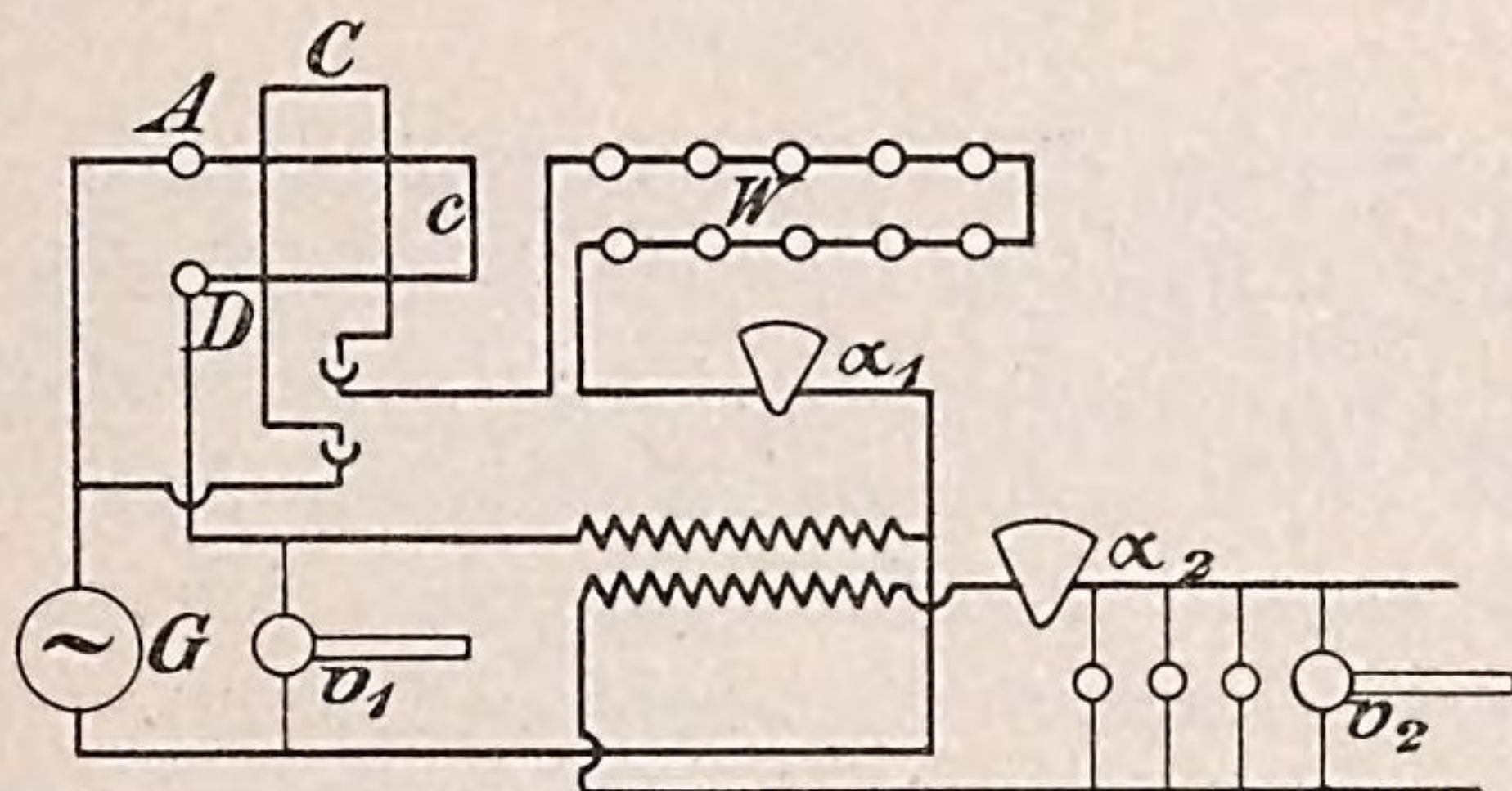


Fig. 72.

zugeführt wird, so muß man die Schaltung dahin abändern, daß der Nebenschluß nicht von B , sondern von A abgezweigt wird. Fig. 72. Dann fließt durch c bloß der Primärstrom des Transformators, und die im Widerstand W aufgezehrte Energie wird nicht mitgemessen.

Die Messung $W D K^2 = P$ gibt genau die den Primärklemmen des Transformators zugeführte Energie. Besteht die Belastung aus Glühlampen, so stellt das Produkt von Strom und Spannung im sekundären Stromkreise die abgegebene Energie dar. Man mißt also am Ampèremeter α_2 den Strom i_2 und am Voltmeter v_2 die Spannung e_2 , und findet den Wirkungsgrad

$$\eta = \frac{i_2 e_2}{W D K^2}.$$

Bei Energiemessungen, die an hochgespannten Strömen gemacht werden, ist es notwendig, die Schaltung so auszuführen, daß keine großen Potentialdifferenzen im Wattmeter selbst auf-

treten können. Die in Fig. 73 dargestellte Schaltung ist mit jener der Fig. 72 theoretisch gleichwertig; praktisch ist jedoch letztere vorzuziehen, da zwischen den beiden Spulen C und c nur eine ganz unbedeutende Potentialdifferenz herrscht, während in Fig. 73

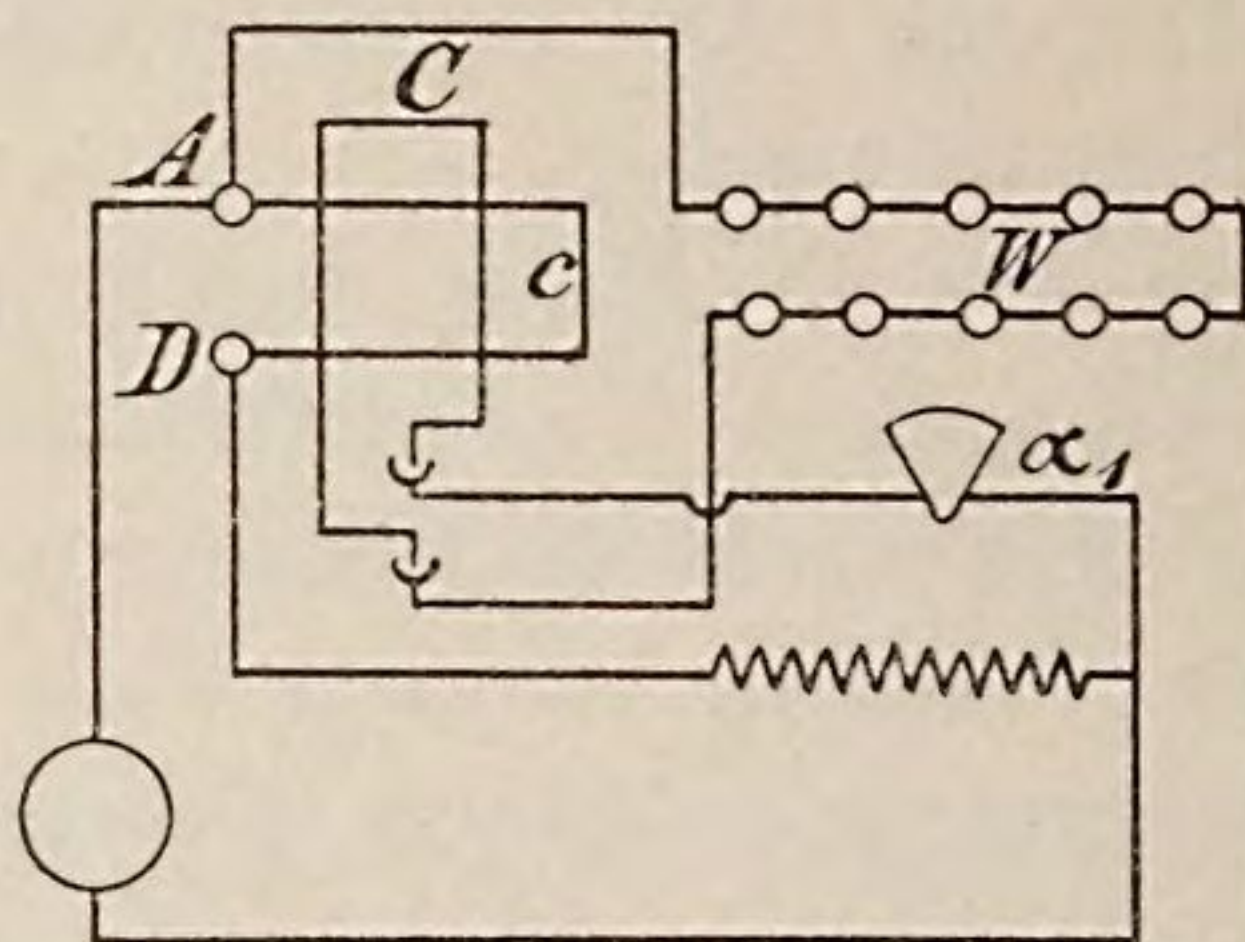


Fig. 73.

zwischen diesen Spulen die volle Potentialdifferenz des Generators auftritt. In diesem Falle ist also ein Durchschlagen der Isolation zu befürchten. Die Schaltung Fig. 72 ist auch deshalb vorzuziehen, weil man, ohne die Isolation des Wattmeters anzustrengen, irgend eine seiner Klemmen an Erde legen und sich so gegen Unfälle bei Berührung des Instrumentes schützen kann.

Bei Ableitung der Theorie des Wattmeters wurde betont, daß der Nebenschlußwiderstand im Vergleich zur Selbstinduktion des Instrumentes so groß ist, daß man die Phasenverschiebung des Nebenschluß-Stromes als gleich 0 annehmen kann. Diese Bedingung kann natürlich nie mit mathematischer Strenge erfüllt sein, denn die im Dynamometer gemessene mechanische Kraft beruht ja auf der Wechselwirkung zwischen Strom und Magnetfeld, und bedingt somit das Vorhandensein einer gewissen Selbstinduktion; aber bei sorgfältiger Ausführung des Instrumentes ist dieselbe so klein, daß sie vernachlässigt werden kann. Es ist übrigens ganz leicht, für die Selbstinduktion des Instrumentes eine Korrektur einzuführen.

Es sei Fig. 74 Oe die Klemmenspannung und Oi der Hauptstrom. Die Phasenverschiebung sei φ , so daß

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{2\pi \sim L}{W},$$

wobei $2\pi \sim L$ die Reaktanz und W der Widerstand des Hauptstromkreises ist. Die Energie ist $Oi \times Oa$.

Wenn das Wattmeter absolut keine Induktanz hätte, so würde der Nebenstrom mit Oe zusammenfallen; infolge der Induktanz

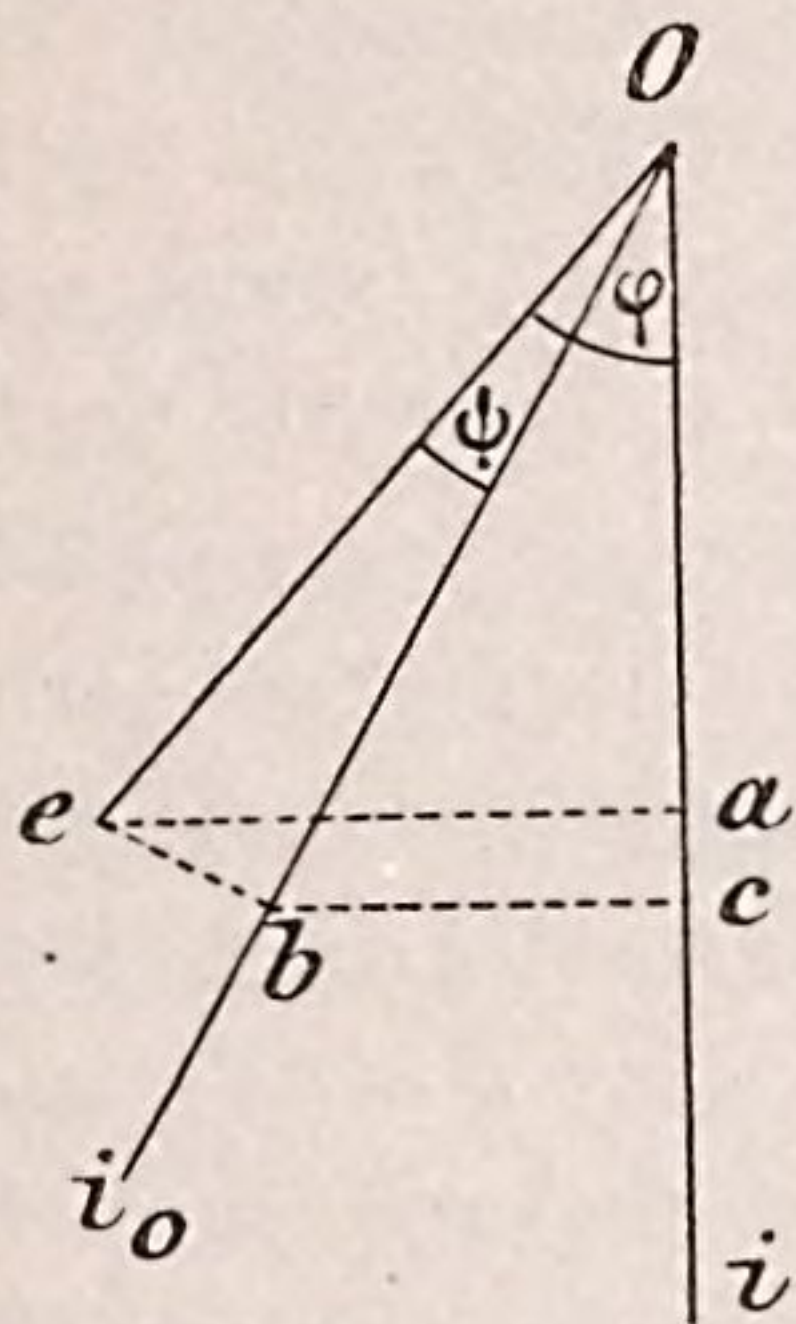


Fig. 74.

jedoch bleibt der Nebenstrom um den Winkel ψ zurück und nimmt die Lage Oi_0 ein. Sei w der Widerstand des Nebenschlusses und l sein Selbstinduktions-Koeffizient, so ist

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{2\pi \omega l}{w}.$$

Infolge der Phasenverschiebung ψ zeigt das Wattmeter nicht die wirkliche Energie $Oi \times Oa$, sondern die scheinbare Energie $Oi \times Oc$ an, und um aus der Ablesung die wirkliche Energie zu finden, müssen wir die Ablesung mit dem Verhältnis $\frac{Oa}{Oc}$ multiplizieren. Ist also P' die scheinbare Energie, die wir am Wattmeter ablesen, so ist die wahre Energie

$$P = P' \times \frac{Oa}{Oc}.$$

Nun ist $Oa = Oe \times \cos \varphi$ und $Oc = Ob \times \cos (\varphi - \psi) = Oe \times \cos \psi \cos (\varphi - \psi)$ und mithin

$$P = P' \frac{\cos \varphi}{\cos \psi \cos (\varphi - \psi)}.$$

Da der Winkel ψ eine Konstante des Instrumentes ist, so kann man ihn ein für alle Mal voraus bestimmen. Die Phasenverschiebung $(\varphi - \psi)$ zwischen Haupt- und Nebenstrom kann man aus

$$\cos (\varphi - \psi) = \frac{D}{\sqrt{D_1 D_2}}$$

bestimmen und mithin auch die Phasenverschiebung φ zwischen der EMK und dem Hauptstrom. Das Korrektionsglied in der Gleichung für P ist also ganz leicht bestimmbar. Wir können dasselbe auch in die Form bringen

$$\frac{1 + \operatorname{tg}^2 \psi}{1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \psi}.$$

Ist $\psi < \varphi$, so wird dieser Ausdruck kleiner als 1 und die am Wattmeter abgelesene Energie ist größer als die wirkliche Energie. Ist jedoch φ sehr klein (z. B. bei Belastung des Transformators mit Glühlampen) und ψ verhältnismäßig groß, so kann es kommen, daß $\psi > \varphi$ ist, und dann gibt das Wattmeter einen geringeren als den wirklichen Wert der Energie an. Das Gleiche ist der Fall, wenn der Nebenstromkreis erhebliche Kapazität hat und so ψ negativ wird.

Für zwei besondere Werte von ψ wird das Korrektionsglied gleich 1 und das Wattmeter gibt die wahre Energie an; erstens wenn $\psi = 0$, d. h. wenn das Instrument so genau gearbeitet ist, daß bei einem sehr großen Widerstand im Nebenschluß noch genaue Ablesung möglich ist; zweitens wenn $\psi = \varphi$, d. h. wenn die Phasenverschiebung im Nebenschluß genau gleich ist jener im Hauptstromkreise. Der in der Praxis am häufigsten vorkommende Fall ist, daß ψ einen positiven und sehr kleinen Wert hat, und daß $\varphi > \psi$ ist. Dann ist das Korrektionsglied kleiner als 1 und erreicht sein Minimum für $\psi = \frac{\varphi}{2}$. Die größte mögliche

Korrektur ist dann $\frac{\cos \varphi}{\cos \frac{\varphi}{2}}$ und dieser Ausdruck gibt uns auch

die Fehlergrenze, wenn man die Korrektur vernachlässigt. Die folgende Tabelle zeigt diese Grenzwerte für verschiedene Werte der Phasenverschiebung φ .

φ	Abgelesene Energie	Die wirkliche Energie ist gleich oder größer als	Der Fehler ist gleich oder kleiner als
5°	1000 Watt	998,5 Watt	0,15%
10°	1000 »	994,6 »	0,54%
15°	1000 »	982,7 »	1,73%
20°	1000 »	968,8 »	3,12%
25°	1000 »	950,8 »	4,92%
30°	1000 »	928,2 »	7,18%

Andere Methoden der Energiemessung. Ein sorgfältig konstruiertes Wattmeter ist entschieden das bequemste und genaueste Instrument zur Energiemessung. Wenn man jedoch ein solches nicht zur Hand hat, kann man sich auch anderer, allerdings nicht ebenso bequemer Methoden bedienen. Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden: a) die Energie wird im Meßapparate selbst in Wärme umgesetzt; b) sie muß gemessen werden, während sie den Meßapparat durchfließt, und an einer anderen Stelle in Wärme umgesetzt oder sonstwie verwertet wird. Man kann diese zwei Arten der Messungen als Absorptions- und Transmissionsmethoden bezeichnen.

Als Beispiel der Absorptionsmethode möge die Messung der von einem Wechselstromgenerator abgegebenen Energie dienen. Die Maschine arbeitet auf einen metallischen Widerstand, der nicht induktionsfrei zu sein braucht, jedoch aus einem Material bestehen soll, welches einen möglichst kleinen Temperatur-Koeffizienten hat (Platinoid, Manganin, Nickelin etc.). Zur Messung gebraucht man ein genaues Ampèremeter und eine Wheatstonesche Brücke. Man beobachtet den Strom bei Dauerbetrieb, d. h. nachdem der Widerstand seine höchste Temperatur erreicht hat, und stellt dann den Betrieb ein. So schnell als möglich darauf mißt man den Widerstand auf der Brücke und wiederholt die Messung in Intervallen von etwa 10 Sekunden, um das Gesetz der Abnahme des Widerstandes mit fallender Temperatur zu ermitteln. Der Widerstand wird dann als Funktion der Zeit in einer Kurve aufgetragen, und diese nach rückwärts verlängert, bis zu dem Zeitpunkte, wo der Strom unterbrochen wurde. Die zugehörige Ordinate gibt den wirklichen Widerstand W , den der Strom i zu überwinden hatte, und die Energie kann dann nach der Formel $P = i^2 W$ berechnet werden. Bei zweckmäßiger Einstellung der Brücke und Anordnung der Schalter kann man rasch arbeiten und so einen sehr hohen Grad von Genauigkeit in der Messung erzielen.

Ein anderes Beispiel der Absorptionsmethode ist die Messung der in einem Transformator verlorenen Energie mittels Temperaturbeobachtungen. Man mißt bei Dauerbetrieb die Temperaturerhöhung des Transformators, schaltet dann den Wechselstrom ab, und sendet durch die Hochspannungsspule einen Gleichstrom, dessen Stärke so reguliert wird, daß die Temperaturerhöhung die gleiche

bleibt. Die durch den Gleichstrom zugeführte Energie ist dann gleich jener, welche früher bei Betrieb mit Wechselstrom im Transformator verloren ging. Die Energie des Gleichstromes kann durch Spannung und Strommessung leicht bestimmt werden. Zur Temperaturmessung empfiehlt es sich, ein Weingeistthermometer zu verwenden, da im Quecksilber durch das Wechselstromfeld Wirbelströme entstehen und so die Angabe des Quecksilberthermometers ungenau wird. Diese Methode der Energiemessung ist zeitraubend und erfordert viel Übung und persönliche Geschicklichkeit, um einigermaßen genaue Resultate zu geben.

Unter den Transmissionsmethoden sind zu erwähnen die Messung mittels Wattmeter, die oben schon behandelt wurde, und die sogenannte »Drei-Voltmeter-Methode« von Ayrton, und »Drei-Ampèremeter-Methode« von Fleming.

Drei-Voltmeter-Methode. In Fig. 75 ist G der Generator, α ein Ampèremeter, W ein induktionsloser Widerstand, und T der Transformator. Ein Voltmeter wird zwischen die Hauptleitungen

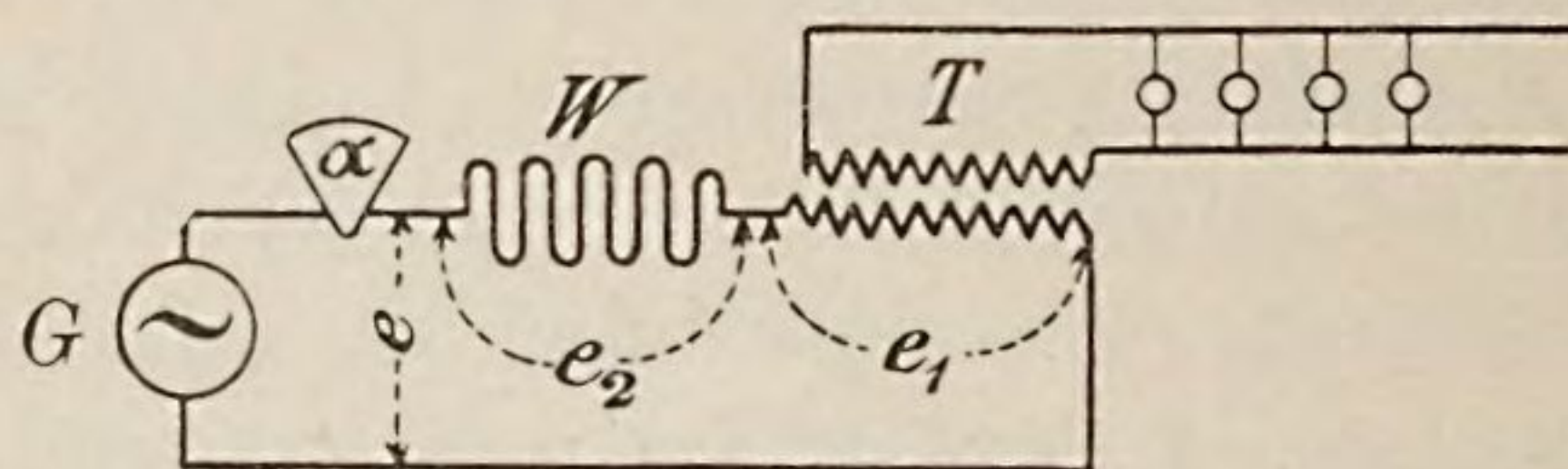


Fig. 75.

gelegt, um die gesamte Spannung e anzugeben, ein anderes Voltmeter wird mit den Klemmen der Primärspule von T verbunden, und zeigt die Spannung e_1 an, und ein drittes Voltmeter zeigt die Spannung e_2 zwischen den Klemmen des Widerstandes an. Statt drei besondere Voltmeter zu benützen, kann man auch ein einziges verwenden, welches durch eine entsprechende Wippe in rascher Reihenfolge mit den betreffenden Punkten des Stromkreises verbunden wird, so daß die Werte e , e_1 , e_2 mit dem gleichen Instrument beobachtet werden. Diese Einrichtung ist nicht nur einfacher, sondern auch genauer, weil Aichungsfehler weniger schwer ins Gewicht fallen. Das Vektordiagramm ist in Fig. 76 dargestellt. OI ist der Strom, $OE_1 = e_1$ ist die Spannung zwischen den Klemmen der Spule, und $E_1E = e_2$ jene zwischen den Klemmen des Widerstandes. Da letzterer induktionslos ist, muß E_1E der Linie OI parallel sein. $OE = e$ ist die Gesamtspannung. Die Watt-

komponente der Klemmenspannung e_1 ist $e_w = OA$ und die Energie ist $OI \times OA$. Da nun diese Spule Induktanz hat, so ist $E_1 A$

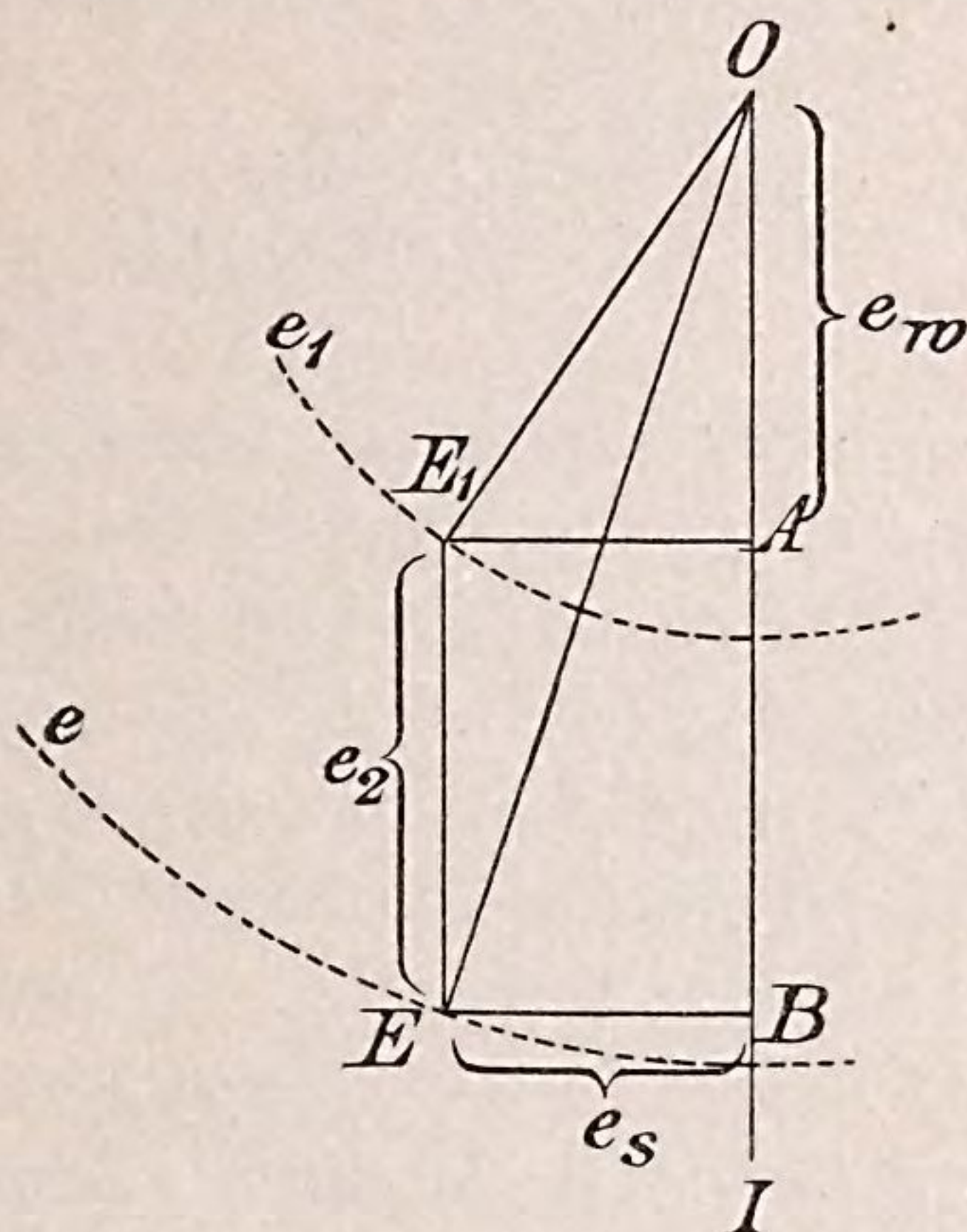


Fig. 76.

$= EB = e_s$, d. h. gleich der EMK der Selbstinduktion, und es bestehen die Gleichungen

$$\begin{aligned} e_s^2 &= e_1^2 - e_w^2 \\ e_s^2 &= e^2 - (e_w + e_2)^2, \end{aligned}$$

woraus durch einfache Umrechnung folgt

$$e_w = \frac{e^2 - e_1^2 - e_2^2}{2e_2}.$$

Die Energie ist also gegeben durch den Ausdruck

$$P = i \frac{e^2 - e_1^2 - e_2^2}{2e_2}.$$

Zur Bestimmung derselben sind also vier Ablesungen nötig, nämlich drei für Spannung und eine für Strom. Wenn man den Widerstand von W genau kennt, so kann man die Strommessung weglassen und die Energie nach der Formel berechnen

$$P = \frac{e^2 - e_1^2 - e_2^2}{2W}.$$

Das ist die Energie, welche dem Transformator zugeführt wird. Will man die vom Generator abgegebene Energie bestimmen, so muß man zu P noch $\frac{e_2^2}{W}$ addieren und erhält

$$P' = \frac{e^2 + e_2^2 - e_1^2}{2W}.$$

Anstatt P nach obiger Formel zu berechnen, kann man die Wattkomponente von e_1 auch graphisch finden, indem man mit e_1 und e Kreisbogen zeichnet und eine senkrechte Linie parallel zu sich selbst so lange verschiebt, bis das zwischen den beiden Kreisbogen abgeschnittene Stück genau gleich e_2 ist. Das gibt die Lage des Punktes E_1 und mithin die Länge $OA = e_w$. Die Energie ist dann $P = e_w i$. Aus dem Diagramm ist ohne weiteres ersichtlich, daß ein kleiner Fehler in der Bestimmung der Spannungen einen um so größeren Fehler im Resultat erzeugen muß, je näher der Kreis e_1 an O oder an e liegt. Die Konstruktion wird offenbar am genauesten, wenn e_1 ungefähr den halben Radius von e hat. Es empfiehlt sich also, den Widerstand W so zu wählen, daß e_2 von e_1 nicht sehr verschieden ist. Es muß dann e erheblich größer als e_1 sein, d. h. man muß eine Stromquelle zur Verfügung haben, welche eine erheblich höhere Spannung gibt, als der zu untersuchende Apparat braucht. Wo man eine entsprechende Maschine zur Verfügung hat, oder durch Herauftransformieren die Spannung entsprechend erhöhen kann, ist die eben beschriebene Methode sehr bequem und genau; hat man aber weder eine Maschine noch einen Transformator zur Erzeugung der höheren Spannung, so ist diese Methode nicht anwendbar, und man muß die

Drei-Ampèremeter-Methode

verwenden. Das ist eine von Dr. Fleming angegebene Abänderung der Ayrtonschen Methode und wird besonders dann mit Vorteil angewendet, wenn man den Strom von einem Elektrizitätswerk unter der Spannung bezieht, für welche der Transformator gebaut ist. Die Anordnung ist in Fig. 77 dargestellt. K sind die Klemmen der Stromzuleitung, α ist ein Ampèremeter, welches den Gesamtstrom anzeigt, und α_1 und α_2 sind Ampère-

meter, welche seine beiden Komponenten anzeigen. W ist ein induktionsloser Widerstand, und T ist der zu untersuchende Trans-

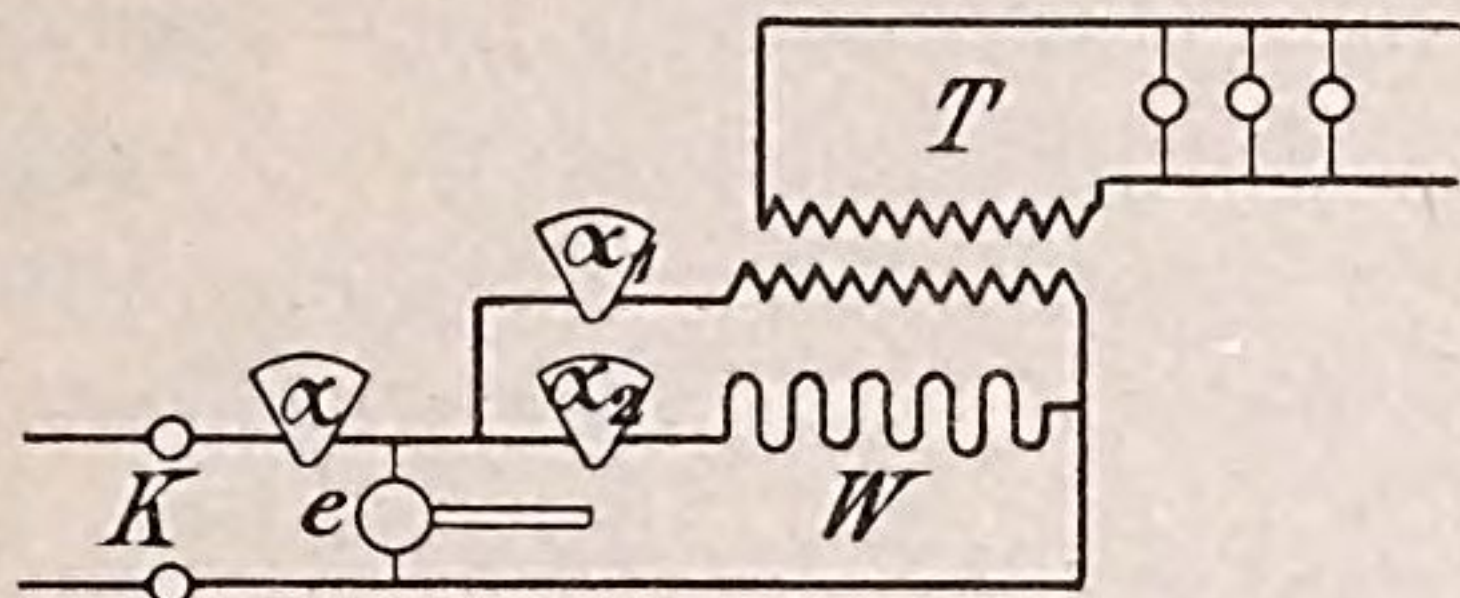


Fig. 77.

formator. In Fig. 78 ist OE der Spannungsvektor, i_1 der Primärstrom von T und i_w seine Wattkomponente; i_2 ist der Strom in

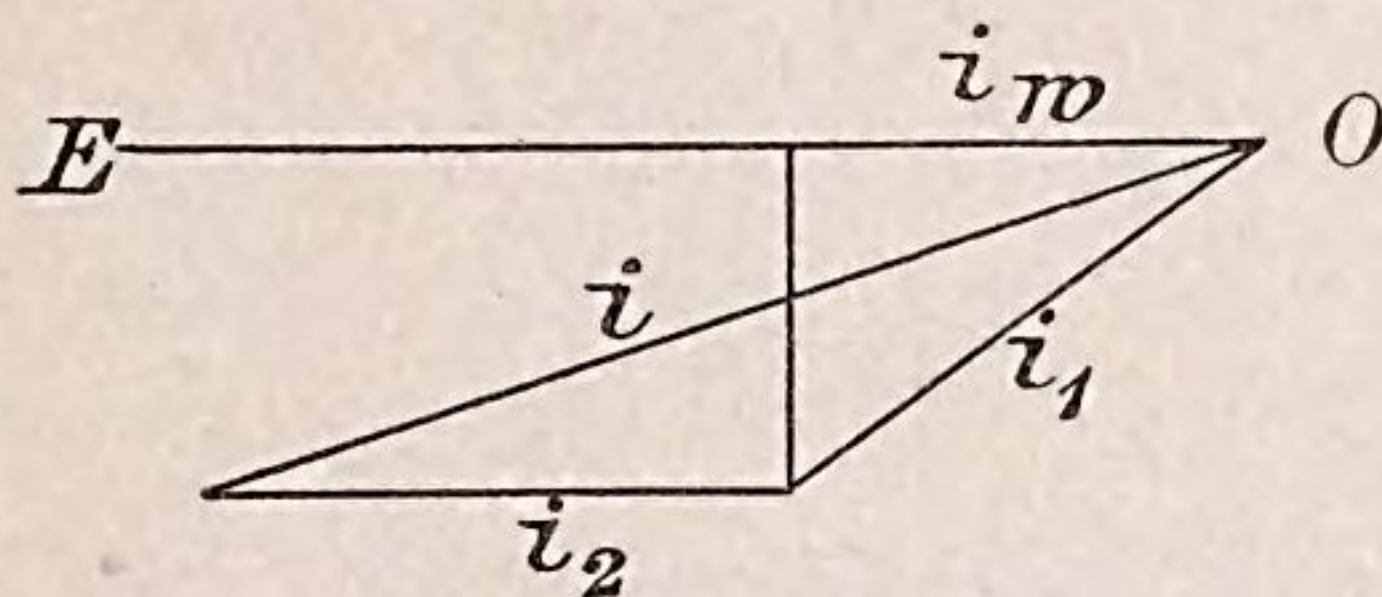


Fig. 78.

W , dessen Vektor zu OE natürlich parallel ist. Dann muß offenbar

$$i_1^2 - i_w^2 = i^2 - (i_w + i_2)^2$$

sein, woraus die Energie

$$e i_w = P = \frac{e}{2} \frac{(i^2 - i_1^2 - i_2^2)}{i_2}.$$

Kennt man den Widerstand W genau, so braucht man e nicht zu messen und kann die Energie nach der Formel berechnen

$$P = \frac{W}{2} (i^2 - i_1^2 - i_2^2).$$

Auch hier empfiehlt es sich, zur Erzielung größtmöglicher Genauigkeit dem Widerstand W einen solchen Wert zu geben, daß i_2 von i_1 nicht zu sehr verschieden ausfällt.

Bei der Ableitung beider Methoden haben wir das Vektordiagramm benützt und stillschweigend die Voraussetzung gemacht, daß die Spannung sowohl als auch der Strom Sinusfunktionen sind. Es fragt sich nun, ob diese Methoden auch dann anwendbar bleiben, wenn Strom und Spannung nicht nach dem Sinusgesetz, sondern nach irgend einer Funktion der Zeit variieren. Daß das

Wattmeter für alle Ströme genaue Resultate gibt, wurde schon bewiesen, und da man bei gleichzeitiger Messung mit dem Wattmeter und nach einer der anderen hier besprochenen Methoden immer zu denselben Resultaten kommt, so zeigt dieses, daß diese Methoden auch für Ströme aller Formen anwendbar sind. Es läßt sich das übrigens auch noch ganz allgemein beweisen. Für unseren Zweck genügt es, diesen Beweis für die Drei-Voltmeter-Methode zu führen; seine Anwendung auf die Drei-Ampèremeter-Methode kann dem Leser überlassen bleiben. Bezeichnen wir mit kleinen Buchstaben die temporären Werte von Strom und Spannungen, so ist zu irgend einer Zeit t

$$e = e_1 + e_2$$

$$i = \frac{e_2}{W}.$$

Die in diesem Augenblicke durch den Apparat fließende Energie ist

$$p = i e_1 = \frac{e_1 e_2}{W}.$$

Da $e^2 = e_1^2 + 2 e_1 e_2 + e_2^2$, so ist

$$e^2 = e_1^2 + 2 p W + e_2^2$$

und mithin

$$p = \frac{1}{2W} (e^2 - e_1^2 - e_2^2).$$

Die in der Zeit einer Periode geleistete Arbeit ist $\int_0^T p dt$ und mithin die effektive Energie

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt$$

$$P = \frac{1}{2W} \frac{1}{T} \left(\int_0^T e^2 dt - \int_0^T e_1^2 dt - \int_0^T e_2^2 dt \right).$$

Nun sind aber die Ausdrücke von der Form $\frac{1}{T} \int_0^T e^2 dt$ nichts anderes als die quadratischen Mittelwerte der Spannungen, d. h. die Quadrate der an den Voltmetern abgelesenen sog. effektiven

Spannungen. Bezeichnen wir jetzt diese mit den Buchstaben e , e_1 und e_2 , so finden wir den gleichen Ausdruck für die Energie, der unter Benützung des Vektordiagrammes abgeleitet wurde, nämlich

$$P = \frac{1}{2W} (e^2 - e_1^2 - e_2^2).$$

Da dieses Resultat unter der Annahme erhalten worden ist, daß die Strom- und Spannungskurven von ganz beliebiger Form sind, so ist damit der Beweis geliefert, daß die Drei-Voltmeter-Methode in allen Fällen anwendbar ist.

Die Prüfung von Transformatoren. Mittels der verschiedenen hier angegebenen Meßmethoden kann man Leistung und Wirkungsgrad eines Transformators bestimmen, vorausgesetzt, daß eine geeignete Stromquelle und ein Apparat zur Aufnahme des sekundären Stromes zur Verfügung steht. Da jedoch der Wirkungsgrad der Transformatoren meist sehr hoch ist, so macht seine unmittelbare Bestimmung aus der zugeführten und wiedergewonnenen Leistung insofern Schwierigkeiten, als kleine Fehler bei der Messung dieser Leistungen ziemlich große Fehler im berechneten Verhältnis beider hervorbringen können. Denken wir uns z. B., daß die wirklich zugeführte Leistung 100 und die wirklich abgegebene Leistung 97 sei, daß man aber bei beiden Messungen einen Fehler von 1% macht und zwar negativ im ersten und positiv im zweiten Fall. Man würde also messen: Zugeführte Leistung 99; wiedergewonnene Leistung 98. Nach dieser Messung würde der Wirkungsgrad scheinbar 99% sein, anstatt 97%, wie es wirklich der Fall ist. Um den Einfluß von Meßfehlern möglichst zu vermindern, empfiehlt es sich daher, den Wirkungsgrad nicht direkt durch Messung der zu- und abgeführten Energie zu bestimmen, sondern auf folgende Weise zu verfahren: Man mißt zwei gleiche Transformatoren zusammen und zwar in der Weise, daß die aus dem ersten Transformator entnommene Energie zur Speisung des zweiten verwendet wird und die aus dem zweiten Transformator entnommene Energie unter Zusatz von Energie, welche von einer äußeren Stromquelle geliefert wird, die Speisung des ersten Transformators besorgt. Es handelt sich hier also gewissermaßen um eine Cirkulation von Energie zwischen den beiden Transformatoren, wobei bloß der Energieverlust von außen her gedeckt wird. Man mißt

dann die gesamte cirkulierende Energie und den Energieverlust. Da letzterer verhältnismäßig klein ist, so haben Fehler bei der Messung auf das Endresultat weniger Einfluss als bei der direkten Methode. Die Anordnung ist in Fig. 79 dargestellt. D und B sind die beiden zu prüfenden Transformatoren, und C ist ein kleiner Zusatztransformator, welcher die Cirkulation des Stromes durch die Primärspulen bewerkstelligt. In den primären Stromkreis von C wird ein induktionsloser Rheostat R geschaltet, damit man durch Verschieben des Kontaktes imstande ist, die Zusatz-EMK im primären Stromkreis der Haupttransformatoren so zu regeln, daß der normale Sekundärstrom durch das Ampèremeter α

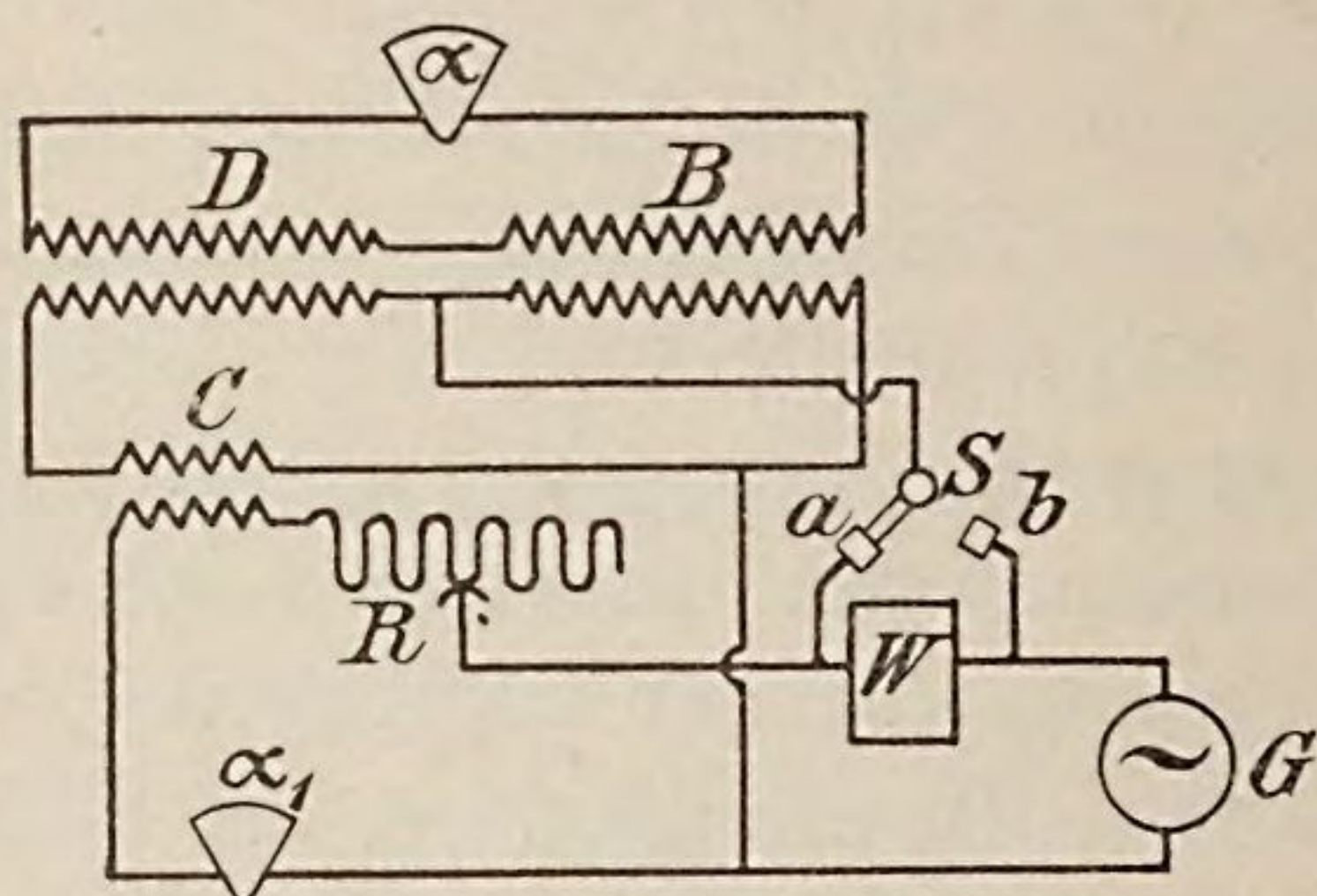


Fig. 79.

fließt. Die Schaltung der Transformatoren D und B muß natürlich derart gemacht werden, daß die EM-Kräfte sich entgegenwirken. Würde man nun bloß den Transformator C anschließen und durch den Generator G betreiben, so könnte man allerdings die vollen Stromstärken in den Transformatoren D und B erzielen, aber nicht die richtige Klemmenspannung. Um diese zu erhalten, muß der Generator in der gezeichneten Weise mit den Primärspulen von D und B verbunden werden. Würde man nun den Transformator C durch Ausschalten des Rheostaten unwirksam machen und seine Sekundärspule kurz schließen, so würde die Maschine G nur den Leerlaufstrom für beide Transformatoren zu liefern haben und, da beide genau gleich sind, würde kein Strom in α angezeigt werden. Schaltet man nun C ein, so bleibt die Klemmenspannung an D und B bestehen; es fließt aber Energie von einem Transformator zum andern, und α zeigt einen Strom an. Nun stellt man den Rheostaten so ein, daß dieser Strom den normalen Wert hat. Dann sind beide Transformatoren mit der normalen Spannung und der normalen Stromstärke belastet.

Man schaltet nun ein Wattmeter W in die Zuleitung vom Generator ein und mißt die Energie, welche gebraucht wird, um alle Verluste zu decken. Diese sind: Stromwärme in R und Verluste in D , B und C . Da man den Wirkungsgrad des kleinen Zusatztransformators kennt, so läßt sich der Verlust in demselben berechnen, wenn man die zugeführte Energie kennt. Mit dem Wattmeter ist ein Schalter S verbunden. Steht der Schalthebel auf dem Kontakt a , so mißt das Wattmeter die gesamte von der Maschine abgegebene Energie; dieselbe sei P_1 . Steht der Hebel auf b , so mißt das Wattmeter die Energie, welche dem Transformator C und Rheostaten R zugeführt wird; dieselbe sei P_c . Der Primärstrom i von C wird an α_1 abgelesen. Bedeutet w den Widerstand des Rheostaten bei der entsprechenden Stellung seines Schleifkontaktes, so ist die Energie, welche C erhält, $P_c - i^2 w$. Ist η' der Wirkungsgrad des kleinen Transformators, so gibt er $\eta' (P_c - i^2 w)$ sekundär ab. Die Maschine gibt primär an die beiden Transformatoren $P_1 - P_c$, und somit ist der Verlust in den beiden Transformatoren D und B

$$P_v = P_1 - P_c + \eta' (P_c - i^2 w).$$

Es sei P die Leistung und η der Wirkungsgrad des Transformators D . Es erhält also D primär P Watt und gibt ηP Watt ab. B erhält ηP Watt und gibt an den Hochspannungsklemmen $\eta^2 P$ Watt ab. Wir haben also

$$P_v = P - \eta^2 P$$

$$\eta = \sqrt{\frac{P - P_v}{P}}.$$

Aus dieser Gleichung sieht man, daß ein mäßiger Fehler in der Messung von P_v nur einen sehr kleinen Fehler in der Bestimmung des Wirkungsgrades hervorrufen kann. Nach unserem früheren Beispiel würde für $P = 100$ $P_v = 6$ sein. Wenn wir genau messen, so bekommen wir $\eta = \frac{1}{10} \sqrt{94} = 0,9695$. Nehmen wir nun an, daß wir wie früher in der Bestimmung der Gesamtleistung einen Fehler von 1% und in der Bestimmung der Verluste P_v sogar einen Fehler von 5% machen, so kann der Fehler in der Berechnung des Wirkungsgrades höchstens nur ungefähr $\frac{1}{4}\%$ betragen. Diese Methode, den Wirkungsgrad zu bestimmen, ist

also viel genauer als die Methode der direkten Messung. Sie hat übrigens noch zwei Vorteile; erstens braucht man keinen Widerstand oder anderen Apparat, welcher die ganze von der Sekundärspule abgegebene Energie aufzunehmen imstande ist, und zweitens braucht die Stromquelle nur stark genug zu sein, um die Verluste zu decken. Beides sind wesentliche Vorteile, wenn es sich um die Untersuchung von großen Transformatoren handelt.

Die Erwärmung wird am besten auf folgende Art bestimmt. Man bringt die Transformatoren durch Erhitzen in einem heißen Raume oder mittels Gleichstrom auf die voraussichtliche Endtemperatur und betreibt sie dann mit Wechselstrom unter Anwendung der Schaltung Fig. 79. Die Temperatur wird dann mittels Weingeistthermometer von Zeit zu Zeit gemessen, und die Werte werden als Funktion der Zeit graphisch aufgetragen, wobei die Messungen so lange fortgesetzt werden, bis die Temperaturkurve horizontal verläuft.

Wenn Wechselstrom aus einem Elektrizitätswerk zur Verfügung steht, kann die vorhergehende Erwärmung unterbleiben. Die Transformatoren werden dann gleich von Anfang an nach Fig. 79 eingeschaltet und bleiben so lange im Betrieb, bis die Endtemperatur erreicht ist. Der Spannungsabfall wird entweder direkt bei Belastung und unter den normalen Betriebsverhältnissen bestimmt, oder man kann nach der auf S. 116 angegebenen Methode verfahren. Letzteres ist einfacher und genauer.

Die Isolationsmessungen macht man am besten, nachdem die Endtemperatur erreicht ist; auch empfiehlt es sich, die Widerstandsfähigkeit der Isolierung dadurch zu prüfen, daß man bei sonst vollkommen von Erde isolierten Stromkreisen vorübergehend folgende Verbindungen ausführt: a) eine Primärklemme mit einer Sekundärklemme, b) eine Primärklemme mit Erde, c) eine Sekundärklemme mit Erde.

Untersuchung von Blechen. Die für solide Eisenstäbe üblichen Methoden zur Bestimmung der Permeabilität und der Hysteresisschleife sind bei Blechen nicht gut anwendbar, weil es nicht leicht möglich ist, einen zuverlässigen magnetischen Kontakt zwischen dem Muster und den übrigen Teilen des Apparates herzustellen. Man kann allerdings mittels der ballistischen Methode die Hysteresisschleife von ringförmig ausgestanzten Blechen bestimmen, aber das erfordert die Herstellung einer Wickelung für jedes

Muster und gibt das Resultat nur indirekt. Was man bestimmen muß, ist die Hysteresisarbeit bei der normalen Periodenzahl. Die ballistische Methode gibt die Hysteresisschleife bei schrittweiser Änderung der Induktion. Aus dieser Schleife kann die Hysteresisarbeit berechnet werden, nicht jedoch die Verluste durch Wirbelströme. Es ist deshalb besser, die Hysteresisarbeit unmittelbar mittels Wattmeter zu messen, indem man ein bekanntes Gewicht von Blechen der Induktion und zwar bei normaler Periodenzahl aussetzt. Dabei wird natürlich die Arbeit, welche in Wirbelströmen verloren geht, mit gemessen. Die Permeabilität kann auf diese Weise nicht gemessen werden, sie läßt sich jedoch rechnerisch mit ziemlich guter Annäherung aus dem Leistungsfaktor fertiger Transformatoren unter Berücksichtigung des Leerlaufstromes bestimmen. Transformatoren, welche zu dieser Messung dienen sollen, dürfen aber natürlich keine Stofsugen haben.

Eine sehr einfache Methode, Bleche zu prüfen, besteht darin, daß man die Musterbleche in der für den Transformator nötigen Form ausstanzt und in eine Spule einbaut. In den Stromkreis wird ein Wattmeter eingeschaltet und die Leerlaufsarbeit bestimmt. Die Induktion findet man aus der Klemmenspannung, Periodenzahl, der Windungszahl und dem Eisenquerschnitt nach der Formel

$$E = 4,44 \sim n S \mathfrak{B} 10^{-8},$$

wobei der Widerstand der Spule, der außerordentlich klein gemacht werden kann, vernachlässigt wird. Der Gesamtverlust setzt sich zusammen aus dem Hysteresisverlust und dem Wirbelstromverlust. Bleibt die Induktion bei wechselnder Periodenzahl konstant, so variiert der Wirbelstromverlust mit dem Quadrate der Periodenzahl. Man kann ihn also vom Hysteresisverlust getrennt bestimmen, wenn man E verhältnismäßig mit $\sim$ variiert und jedesmal den Arbeitsverlust bestimmt. Nehmen wir an, daß wir zwei Messungen machen bei den Periodenzahlen $\sim_1$ und $\sim_2$ und dabei die Verluste P_1 und P_2 finden, so ist

$$\begin{aligned} P_1 &= h \sim_1 + f \sim_1^2 \\ P_2 &= h \sim_2 + f \sim_2^2. \end{aligned}$$

wobei h und f Koeffizienten sind, die von der Hysteresis und den Wirbelströmen abhängen. Diese Koeffizienten können aus den

zwei Gleichungen bestimmt werden; man findet dann die Werte der Hysteresis- und Wirbelstromverluste getrennt

$$P_h = h \propto_1$$

$$P_f = f \propto_1^2$$

für die Periodenzahl $\propto_1$ und in gleicher Weise für jede andere Periodenzahl.

Bei der eben beschriebenen Methode der Untersuchung ist vorausgesetzt, daß die Musterbleche in der Form ausgestanzt werden, die für die Zusammenstellung des Eisenkörpers nötig ist. Nun ist es nicht immer bequem, die Stücke gerade in dieser Form herstellen zu lassen, da man dabei besondere Vorrichtungen zum Ausstanzen braucht. Es ist deshalb besser, die Untersuchung an Mustern von einfacherer Gestalt, etwa in der Form von Streifen, vorzunehmen, weil diese mit den Scheeren, die in jedem Werke vorhanden sind, zugeschnitten werden können.

Fig. 80 stellt einen Apparat zur Untersuchung von Transformatorblechen dar, welchen Herr v. Dolivo-Dobrowolsky

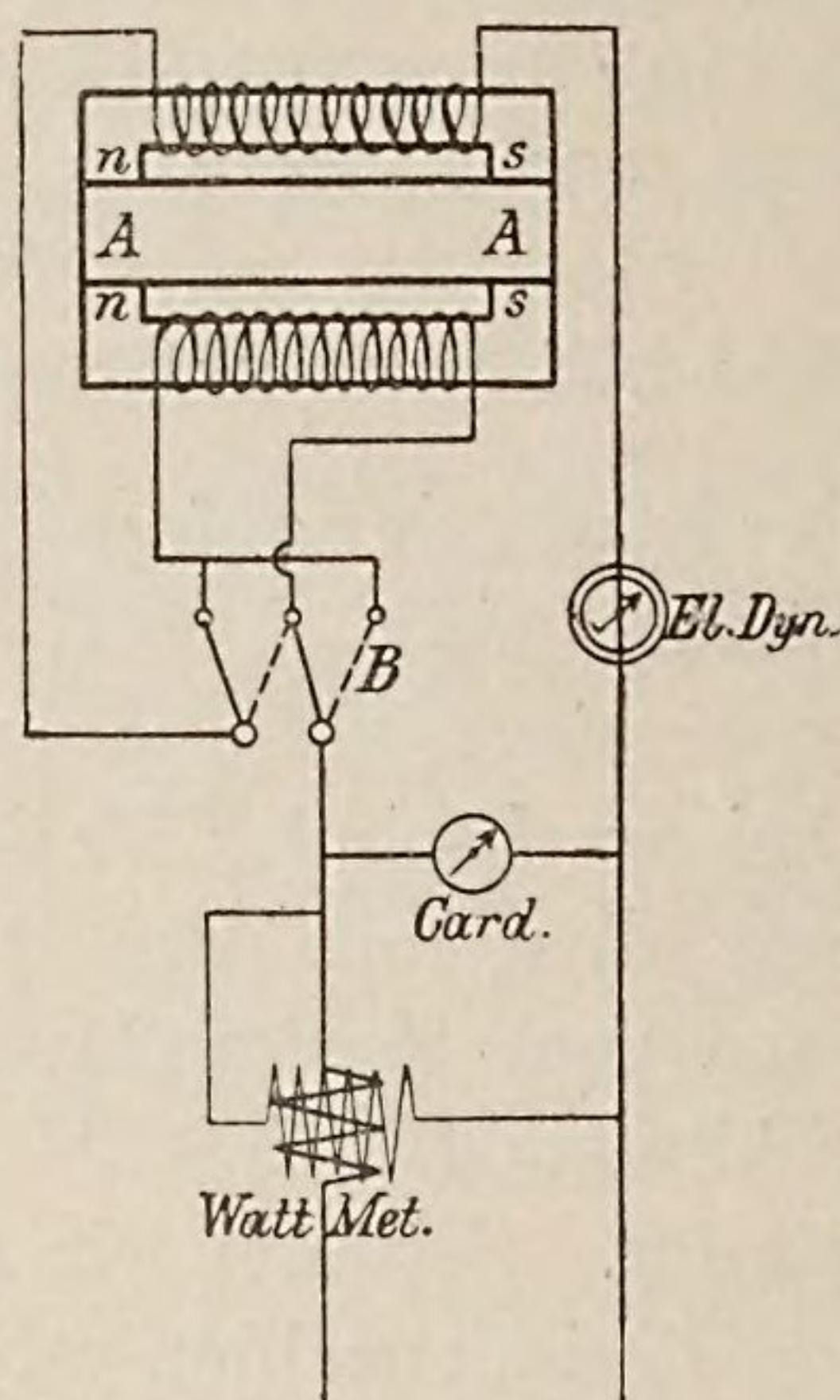


Fig. 80.

für diesen Zweck ersonnen hat.¹⁾ Der Apparat besteht im wesentlichen aus zwei mit Spulen versehenen förmigen Magnetkernen ns , die aus isolierten Blechen zusammengesetzt sind und

¹⁾ ETZ 1892 Heft 30 S. 406.

entweder unmittelbar oder unter Einfügung des zu untersuchenden und aus isolierten Blechstreifen bestehenden Musterstückes *A* aneinander gelegt werden können. Im ersten Falle werden die Spulen derart geschaltet, daß beide den magnetischen Fluß in demselben Sinne treiben; im zweiten Falle werden sie entgegengesetzt geschaltet, so daß bei *n* und *s* konsequente Pole entstehen und der magnetische Fluß durch das Muster getrieben wird. Das Umschalten geschieht mittels des Doppelschalters *B*. Es sind ferner in den Stromkreis eingeschaltet ein Wattmeter, ein Dynamometer und ein Cardew-Voltmeter. Man bestimmt nun zunächst bei magnetischer Serienschaltung der Spulen den Energieverlust bei verschiedenen Werten der Induktion, welche aus den konstruktiven Daten des Apparates und der am Cardew-Voltmeter abgelesenen Spannung berechnet werden. Dann legt man das Muster ein, schaltet die Magnete parallel und wiederholt die Messungen. Der Querschnitt des Musters soll ungefähr doppelt so groß sein, wie jener der Magnete, so daß die Induktion im ganzen System die gleiche ist. Dann stellt die Differenz der Energieverluste den im Muster stattfindenden Verlust dar. Diese Methode leidet jedoch an dem Übelstande, daß die magnetische Streuung sich sehr wesentlich ändert, wenn das Muster eingesetzt wird. Bei magnetischer Serienschaltung ist die Streuung verschwindend klein. Die am Voltmeter abgelesene Spannung ist also wirklich ein Maß für die Induktion. Wird jedoch das Muster eingeschoben, so muß zwischen den Flächen *n* und *s* eine erhebliche magnetische Potentialdifferenz herrschen, welche durch den magnetischen Widerstand der Fugen und des Musters selbst bedingt ist. Infolgedessen findet Streuung statt, und die Induktion ist in der Mitte der Magnetkerne größer als an deren Enden und an den Enden größer als in der Mitte des Musters. Die beobachtete Spannung ist also jetzt nicht mehr ein genaues Maß für die Induktion, und die Bestimmung des Verlustes als Funktion der Induktion kann nicht ganz genau sein.

Dieser Übelstand ist in dem vom Verfasser konstruierten Apparat zur Untersuchung von Blechmustern behoben. Die Muster werden dabei auch aus Streifen zu einem Kern zusammengesetzt, welcher die eine längere Seite eines rechteckigen Rahmens bildet. Die anderen drei Seiten werden von förmig ausgestanzten

Blechen gebildet. Fig. 81 zeigt diese Anordnung.¹⁾ Beide längeren Seiten sind von Spulen umgeben, wobei die obere Spule weit genug ist, um das Einschieben des Musters bequem zu gestatten. Die Spulen sind so geschaltet, daß beide den magnetischen Fluß in der gleichen Richtung treiben, also keine Streuung stattfindet.

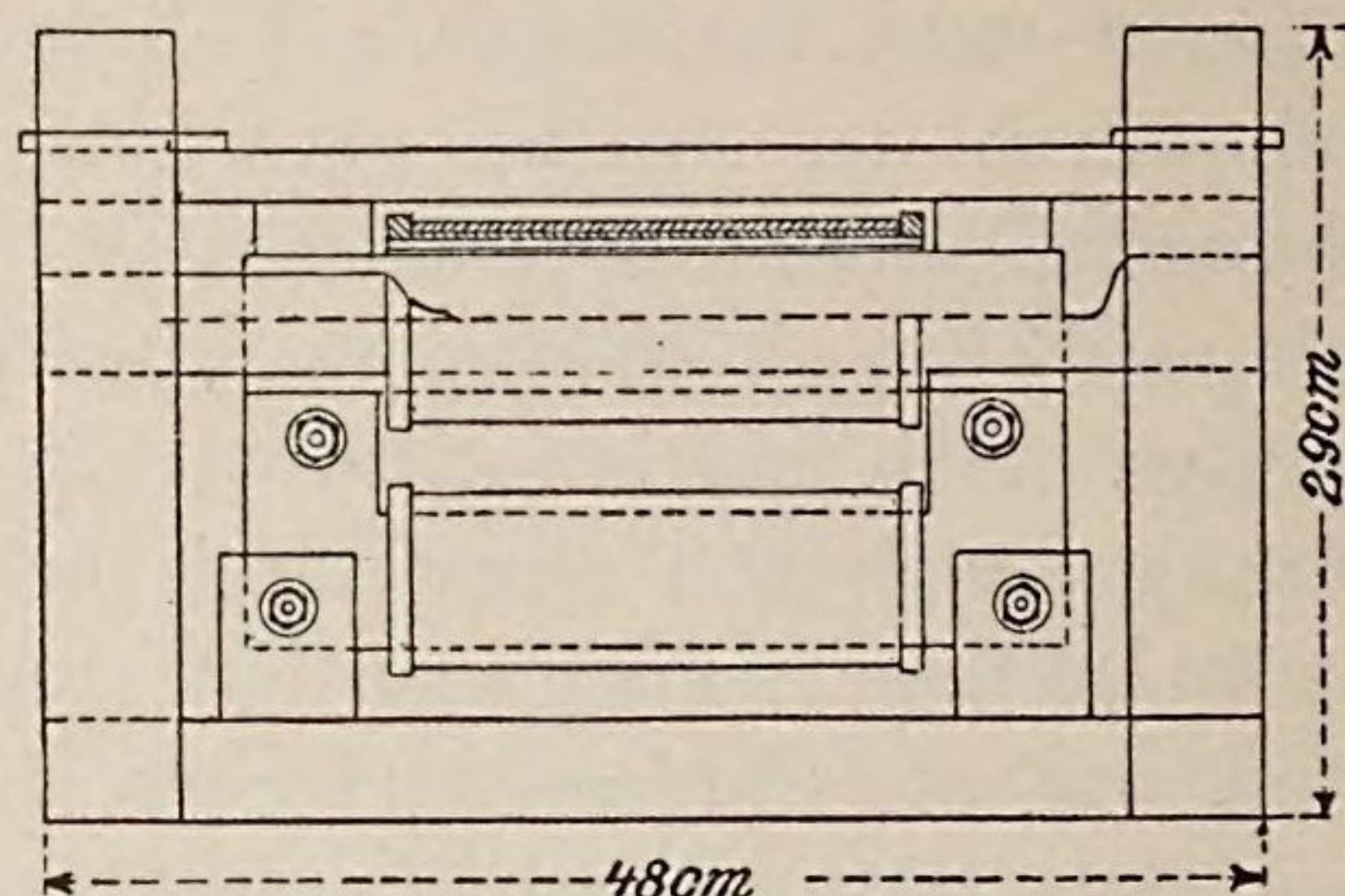


Fig. 81.

Die Spannung wird an den Klemmen der oberen Spule abgenommen, ist also ein direktes Maß für die Induktion im Muster. Es wird nun zunächst ein Muster aus demselben Material hergestellt, wie der feste Kern, und der Verlust als Funktion der Induktion mittels Wattmeter und Voltmeter bestimmt. Dieser Verlust wird dann dem Gewicht der beiden Eisenkörper entsprechend zwischen dieselben verteilt. Man findet auf diese Weise den Verlust für den festen Eisenkörper als Funktion der Induktion. Bringt man nun ein Muster ein und bestimmt den Gesamtverlust, so ergibt sich der Verlust im Muster aus der Differenz zwischen dem Gesamtverlust und dem entsprechenden Werte des Verlustes im festen Eisenkörper. Auch bei diesem Apparate muß der Querschnitt des Musters gleich sein dem des festen Eisenkörpers. Die Verlustkurven, Fig. 9, sind zum Teil mittels des eben beschriebenen Apparates und zum Teil unter Benützung fertiger Transformatoren ermittelt worden.

Ein anderer Apparat zur raschen und bequemen Bestimmung des Hysteresisverlustes in Blechmustern ist von Prof. Ewing angegeben worden.²⁾ Der Grundgedanke seines Apparates ist die rein mechanische Bestimmung der Arbeit, welche durch die Umkehrung des Magnetismus in den zu untersuchenden Mustern von

¹⁾ ETZ 1894 Heft 19 S. 265.

²⁾ ETZ 1895 Heft 19 S. 292.

Blechen verbraucht wird. Die Musterbleche werden in Streifen von 76 mm Länge und 16 mm Breite geschnitten, und ein Bündel solcher Streifen wird in den Apparat eingesetzt.

Die Umkehrung der Magnetisation geschieht durch Drehung einer Kurbel, und das Resultat wird am Zeiger und Skala abgelesen. Bei den dünnen für Transformatoren gebrauchten Blechen genügen 6 bis 8 Streifen, welche in dem Träger *a*, Fig. 82, eingesetzt und

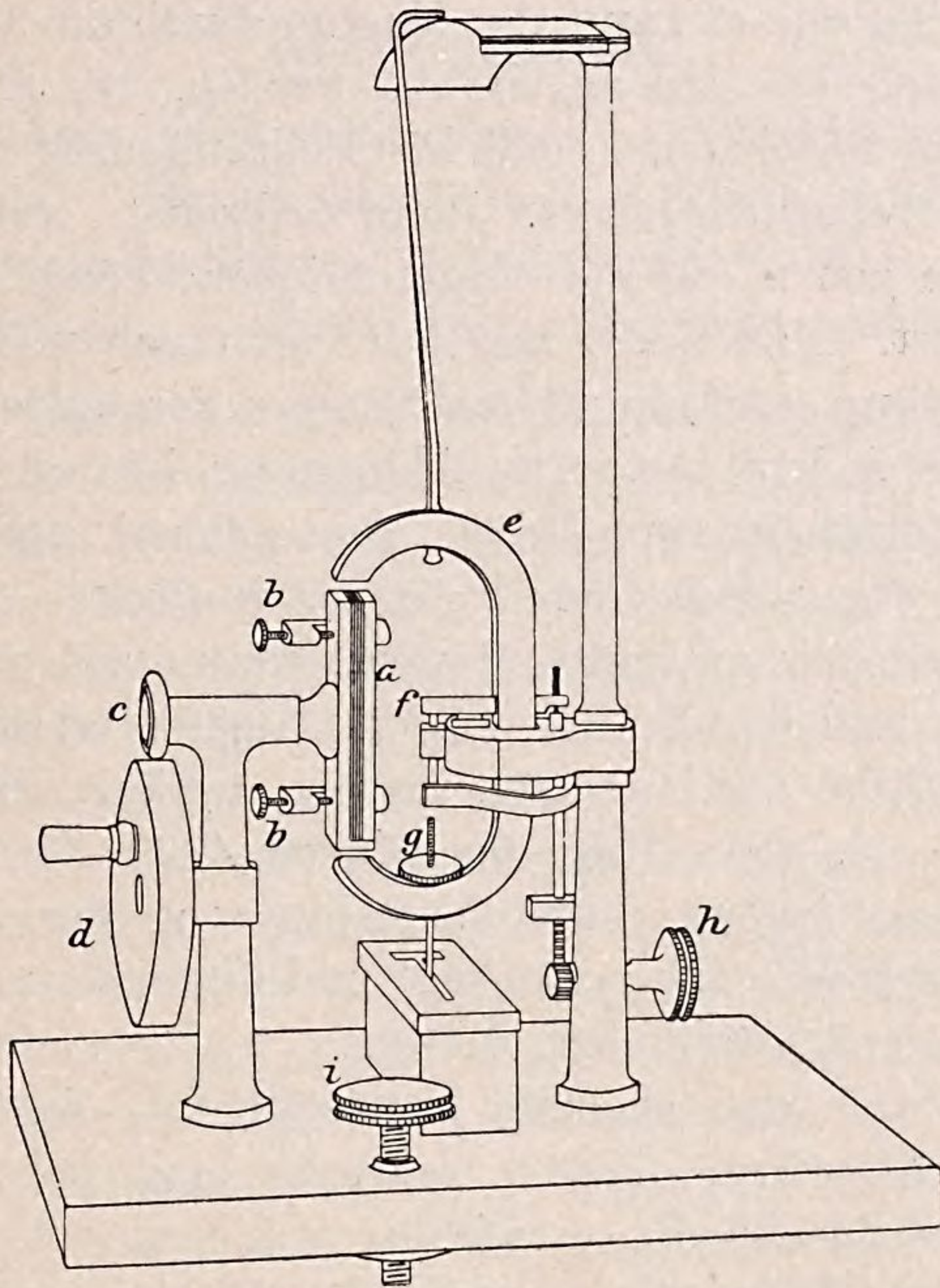


Fig. 82.

durch Schraubenklemmen *b* festgehalten werden. Der Träger wird mittels Friktionsrolle *c* und Antriebsrad *d* von Hand in Rotation gesetzt. Die Enden der Blechstreifen werden so abwechselnd vor den Polen eines permanenten Magneten vorbeigeführt und die mechanische Arbeit, welche durch Hysteresis verbraucht wird, erzeugt ein Drehmoment, welches den Magneten aus seiner Ruhelage ablenkt. Der Magnet ist auf Messerschneiden montiert und entsprechend beschwert, so daß der oben durch den Zeiger an der Skala angegebene Ablenkungswinkel ein Maß für das Dreh-

moment bildet. Da bei jeder Umdrehung ein bestimmter Arbeitswert verbraucht wird, so ist die Ablenkung von der Geschwindigkeit der Drehung unabhängig, so lange nur die Geschwindigkeit nicht so bedeutend ist, daß Wirbelströme entstehen. Der Ausschlag des Magneten ist durch einen unten aufgestellten Katarakt gedämpft und kann durch das Gewicht g , welches auf einem Schraubstift verstellbar ist, innerhalb der gewünschten Grenzen gehalten werden.

Für den Transport kann der Magnet durch die Stellschraube h von den Messerschneiden abgehoben werden. Die Einstellung auf Null geschieht mittels einer seitlichen Schraube und nebenbei noch mittels der Nivellierschraube i . Beim Gebrauch wird das Muster in einer Lehre genau auf die vorgeschriebene Länge abgefeilt und dann eingesetzt. Man dreht zuerst in der einen und dann in der anderen Richtung und nimmt die Summe der beiden Ablesungen als die totale Ablenkung. Die Ablenkung ist sehr nahezu den Hysteresisverlusten in dem Muster proportional, selbst wenn die Permeabilität der verschiedenen Muster in weiten Grenzen differiert, was durch den großen Luftzwischenraum zwischen den Polen des Magneten und den Endflächen des Musters erreicht wird. Die Größe und Stärke des Magneten sind so gewählt, daß die Induktion bei der normalen Dicke der Muster 4000 CGS-Einheiten beträgt; sie kann jedoch durch Verminderung der Zahl der eingeklemmten Musterbleche vergrößert und durch Vermehrung dieser Zahl entsprechend vermindert werden.

Ewing fand, daß es nicht notwendig ist, die Muster gegenseitig genau abzuwägen, indem der Ausschlag sich bei Veränderung der Zahl der Bleche, welche eingeklemmt sind, nur wenig ändert. Er empfiehlt, das Gewicht des Musters annähernd dem von etwa 7 Blechen von 0,34 mm Dicke gleich zu machen. Man würde also bei Untersuchung von Blechen für Dynamoanker, welche dicker sind als die Bleche für Transformatoren, eine entsprechend kleinere Zahl von Musterstreifen in den Apparat einzufragen haben.

Der Apparat wird geaicht durch Versuche an Blechen, deren Hysteresis auch durch die ballistische Methode genau bestimmt wird. Für den praktischen Gebrauch werden dem Instrumente zwei Bündel von Musterblechen beigegeben, nebst einer Tabelle, welche die für diese Muster auf ballistischem Wege bestimmte

Hysteresis enthält. Sind andere Bleche zu untersuchen, so beobachtet man zuerst die Ablenkung mit den Normalmustern und dann jene mit den zu untersuchenden Blechen. Das Verhältniß der beiden Ablenkungen gibt sofort das Verhältniß in den Hysteresisverlusten an. Auf diese Weise wird das Ergebnis der Prüfung von etwaigen Änderungen in der Stärke des permanenten Magneten unabhängig gemacht.

Achtes Kapitel.

Sicherheitsmafsregeln für Transformatoren. — Unterstationen und Einzeltransformatoren. — Spannungserhöher. — Serienschaltung. — Drosselspulen. — Ausgleichsspulen. — Dreileitersystem. — Ausgleichstransformator. — Scott's System der Stromverteilung.

Sicherheitsmafsregeln für Transformatoren. Es wurde schon erwähnt, daß der grofse Vorteil bei Verwendung von Transformatoren darin besteht, daß dadurch die Fernleitung des Stromes unter hoher und seine Verteilung unter mäfsiger Spannung möglich ist. Es ist dabei unerläßliche Bedingung, daß eine genügende Isolation zwischen den primären und sekundären Stromkreisen unter allen Umständen erhalten bleibt. Wird diese Bedingung nicht erfüllt, so wird der oben erwähnte Vorteil illusorisch und zu einem Nachteil, indem dadurch ein ungerechtfertigtes Gefühl der Sicherheit erweckt wird. Nun liegen in einem Transformator die beiden Wickelungen notwendigerweise nahe aneinander, und es ist immerhin die Möglichkeit gegeben, daß die sie trennende Schichte von Isolationsmaterial beschädigt wird und so ein Stromübergang von der Hoch- auf die Niederspannungsspule eintritt. Da nun bei einem verzweigten Verteilungsnetz die Isolation der primären Stromkreise gegen Erde keine absolute sein kann, so muß im Falle einer derartigen Beschädigung die Sekundärspule ein Potential annehmen, welches von jenem der Erde um einen Betrag abweicht, der je nach der Lage und Gröfse des Fehlers von einigen Hundert Volt bis zur Primärspannung variieren kann. Wenn also ein Mensch einen Punkt des sekundären Stromkreises berührt, kann er einen lebensgefährlichen Schlag erhalten. Um diese Gefahr zu vermeiden, ist es notwendig, gewisse Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Eine derselben besteht darin, daß man zwischen die beiden Spulen eine metallische, gut mit Erde ver-

bundene Schichte einlegt. Bei Verletzung der Isolation wird dann nicht Kontakt zwischen Primär- und Sekundärspule entstehen, sondern zwischen Primärspule und Erde, so daß eine Steigerung des Potentials im sekundären Stromkreise unmöglich wird. So lange es sich um Isolationsfehler in den Wickelungen selbst handelt, ist diese Einrichtung vollkommen zuverlässig; wenn jedoch die Isolationsfehler in den Zuleitungen (also außerhalb der Wickelungen) auftreten, so kann die metallische Scheidewand zwischen den Spulen diese Fehler offenbar nicht unschädlich machen. Allerdings kann bei einigermaßen geschickter Anordnung Berührung der Zuleitungen absolut unmöglich gemacht werden; da man aber doch auch mit Fällen rechnen muß, in welchen die Konstruktion des Transformators oder die Anordnung der Verbindungen unzweckmäfsig ist, so muß man für solche Fälle besondere Schutzmafsregeln treffen. Die einfachste derselben besteht darin, daß man einen Punkt der Sekundärwicklung permanent an Erde legt. Am besten wählt man zu diesem Zwecke den Mittelpunkt der Wickelung, weil dann die Potentialdifferenz der Lampenleitungen von Erde ein Minimum wird und zwar gleich der halben Sekundärspannung. Findet nun infolge eines Isolationsfehlers an irgend einer Stelle Berührung zwischen beiden Stromkreisen statt, so wird der primäre Stromkreis sofort an Erde gelegt, womit jede Gefahr für Personen bei Berührung beseitigt ist. Dagegen ist die Gefahr in Bezug auf Feuer etwas vergrößert. Ist die ganze sekundäre Wickelung von Erde isoliert, so muß, bevor Feuergefahr entstehen kann, die Isolation an beiden Lampenleitungen schadhaft werden, während, wenn ein Punkt des sekundären Stromkreises permanent an Erde liegt, schon ein einziger Isolationsfehler genügt, um diese Gefahr herbeizuführen. Der Sicherheitsgrad ist also dadurch auf die Hälfte vermindert worden.

Dieser Übelstand wird vermieden bei Anwendung der von der Thomson-Houston-Gesellschaft vor einigen Jahren eingeführten Sicherung. Dieselbe besteht in einer mit Erde verbundenen Metallplatte und zwei Metallknöpfen *a*, *b* (Fig. 83), welche durch eine ganz dünne Isolierschichte (paraffiniertes Papier oder Glimmer) von ihr getrennt sind. Die Metallknöpfe sind mit den sekundären Leitungen verbunden. So lange die Isolation gut bleibt, besteht zwischen *a*, *b* und Erde blofs die der sekundären Spannung entsprechende Potentialdifferenz, welche nicht genügt, die Isolier-

schichte zu durchbrechen. Kommt jedoch durch einen Fehler in der Isolation zwischen irgend welchen Punkten der beiden Stromkreise die primäre Spannung in die sekundäre Leitung, so wird die Isolierschichte bei *a* und *b* durchgeschlagen und dadurch

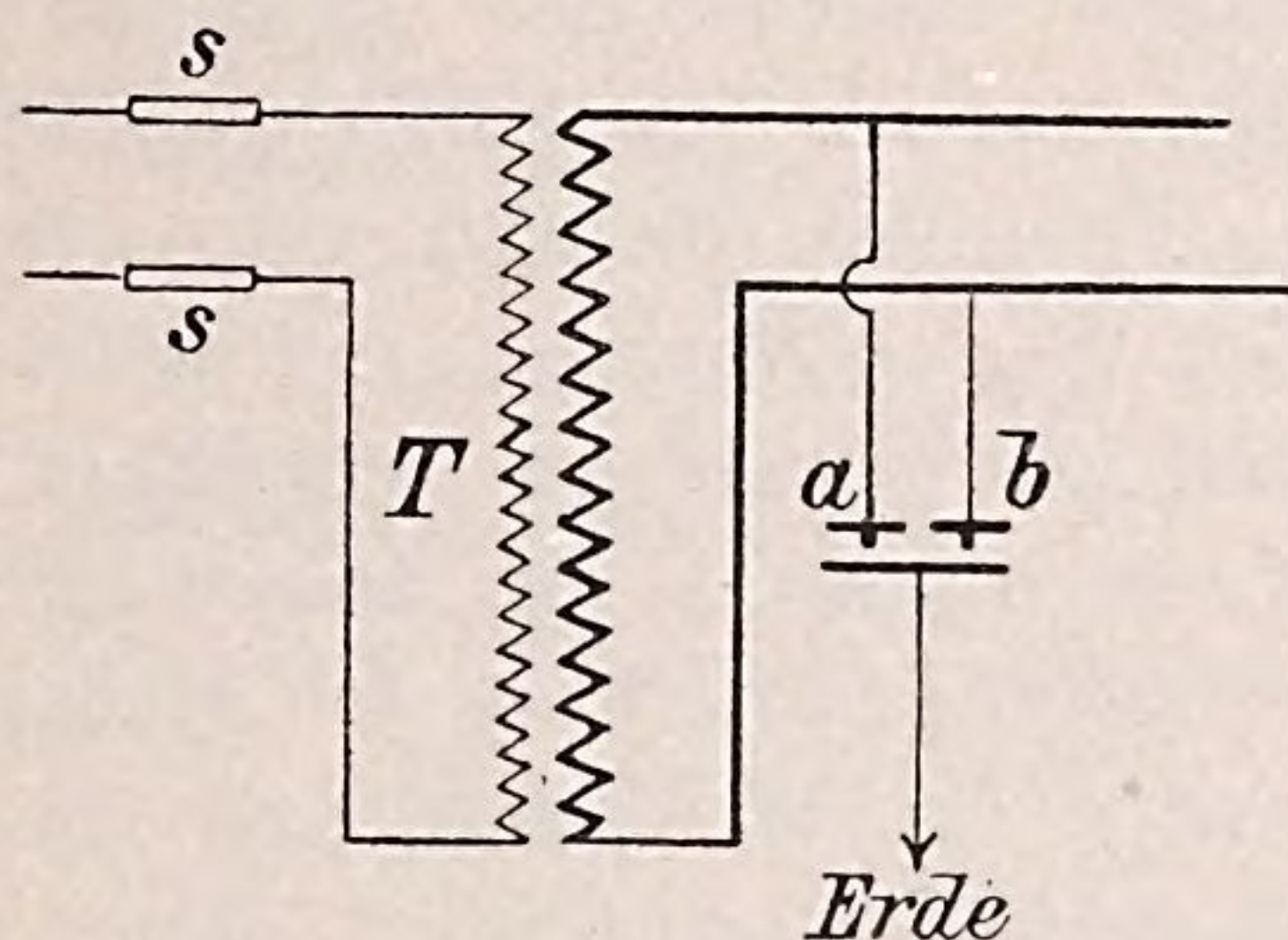


Fig. 83.

in der Sekundärspule Kurzschluss hergestellt. Der Primärstrom steigt dann auf einen solchen Wert, daß die Sicherungen *ss* abschmelzen und so der schadhafte Transformator automatisch vom Hochspannungsnetz abgeschaltet wird.

In der von Major Cardew erfundenen und vielfach verwendeten Sicherung Fig. 84 wird elektrostatische Anziehung benützt,

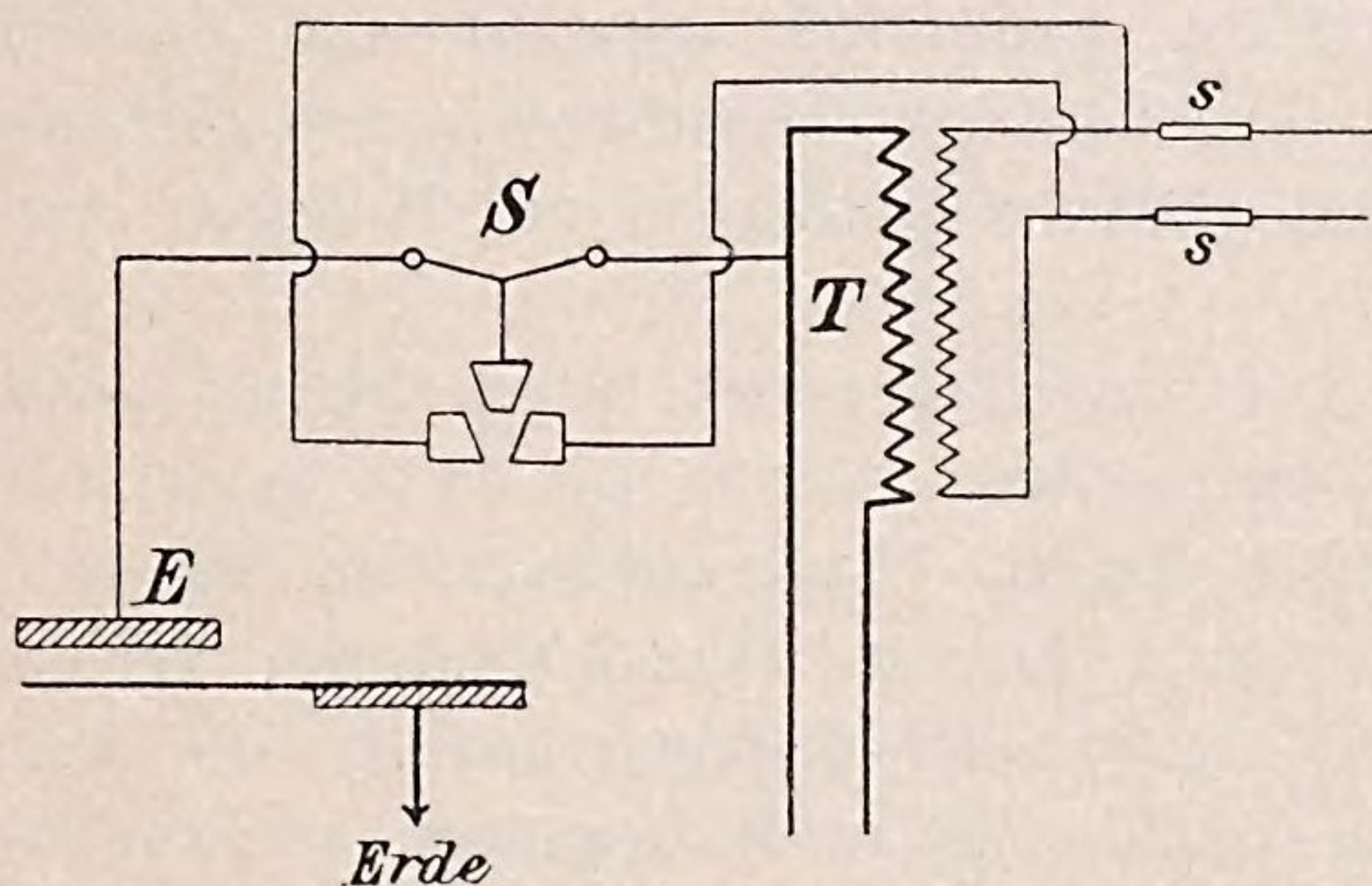


Fig. 84.

um Erdschluss herbeizuführen. Ein Aluminiumstreifen, bestehend aus zwei kreisförmigen, durch einen schmalen Steg verbundenen Scheiben, ist in eine Büchse derart eingelegt, daß eine der Scheiben auf einer mit Erde verbundenen Platte zu liegen kommt, während die andere in einem geringen Abstand unter einer isolierten Metallscheibe liegt, die mit der Sekundärwicklung in

leitender Verbindung steht. Durch ein in den Deckel der Büchse eingedrehtes Schraubengewinde läfst sich der Abstand zwischen dem Aluminiumstreifen und dieser Scheibe genau einstellen. Der Streifen hat also das Potential der Erde, während die Elektrode E das Potential desjenigen Punktes des sekundären Stromkreises hat, an den sie angeschlossen ist. So lange nun die Isolation überall gut ist, kann dieses Potential höchstens den der sekundären Spannung entsprechenden Wert erreichen, und dieser ist zu gering, um Anziehung des Streifens an E zu bewirken. Tritt jedoch ein Isolationsfehler auf, so nimmt E ein höheres Potential an, und es wird durch elektrostatische Anziehung der Aluminiumstreifen mit E in Berührung gebracht. In der ersten, von Cardew angegebenen Anordnung¹⁾ war in der Verbindung von E mit dem Transformator eine Sicherung S vorgesehen, welche beim Abschmelzen (hervorgebracht durch den Kontakt des Streifens mit E) eine Feder oder ein Gewicht losliefs, wodurch Kurzschluß der Primärklemmen eintrat und durch Abschmelzen der Hauptsicherungen ss der schadhafte Transformator von der Hochspannungsleitung abgeschaltet wurde. Es hat sich jedoch herausgestellt, daß die Sicherungen ss auch abschmelzen, wenn die Kurzschlußvorrichtung weggelassen wird. Die Scheibe E kann so genau eingestellt werden, daß bei 400 Volt unfehlbar Erdschluß entsteht und die Sicherungen ss abschmelzen. Die Cardewsche Sicherheitsvorrichtung wirkt also schon bei einem kleinen Fehler in der Isolation zwischen beiden Stromkreisen.

Die Sicherung von Ferranti ist in Fig. 85 schematisch dargestellt. Sie wirkt auch schon bei eintretenden Fehlern. Die Lampenleitungen werden durch die in Serien angeordneten Primärspulen zweier ganz kleiner Transformatoren verbunden, deren Sekundärspulen in Parallelschaltung liegen. Die Verbindung zwischen den Primärspulen ist an Erde gelegt. In den äußeren Stromkreis der Sekundärspulen ist ein Abschmelzdraht eingeschaltet, der ein konisches Gewicht trägt. So lange nun die Isolation überall gut ist, geht durch beide Primärspulen genau der gleiche Strom und es herrscht vollständiges Gleichgewicht zwischen den EM-Kräften der Sekundärspulen, so daß durch den Abschmelzdraht kein Strom fließt. Wird nun an irgend einer Stelle die Isolation

¹⁾ Inst. El. Engineers Journal. Vol. XVII, p. 179.

verschlechtert, so wird dieses Gleichgewicht zerstört, und es fließt ein Strom durch den Abschmelzdraht. Das konische Gewicht fällt

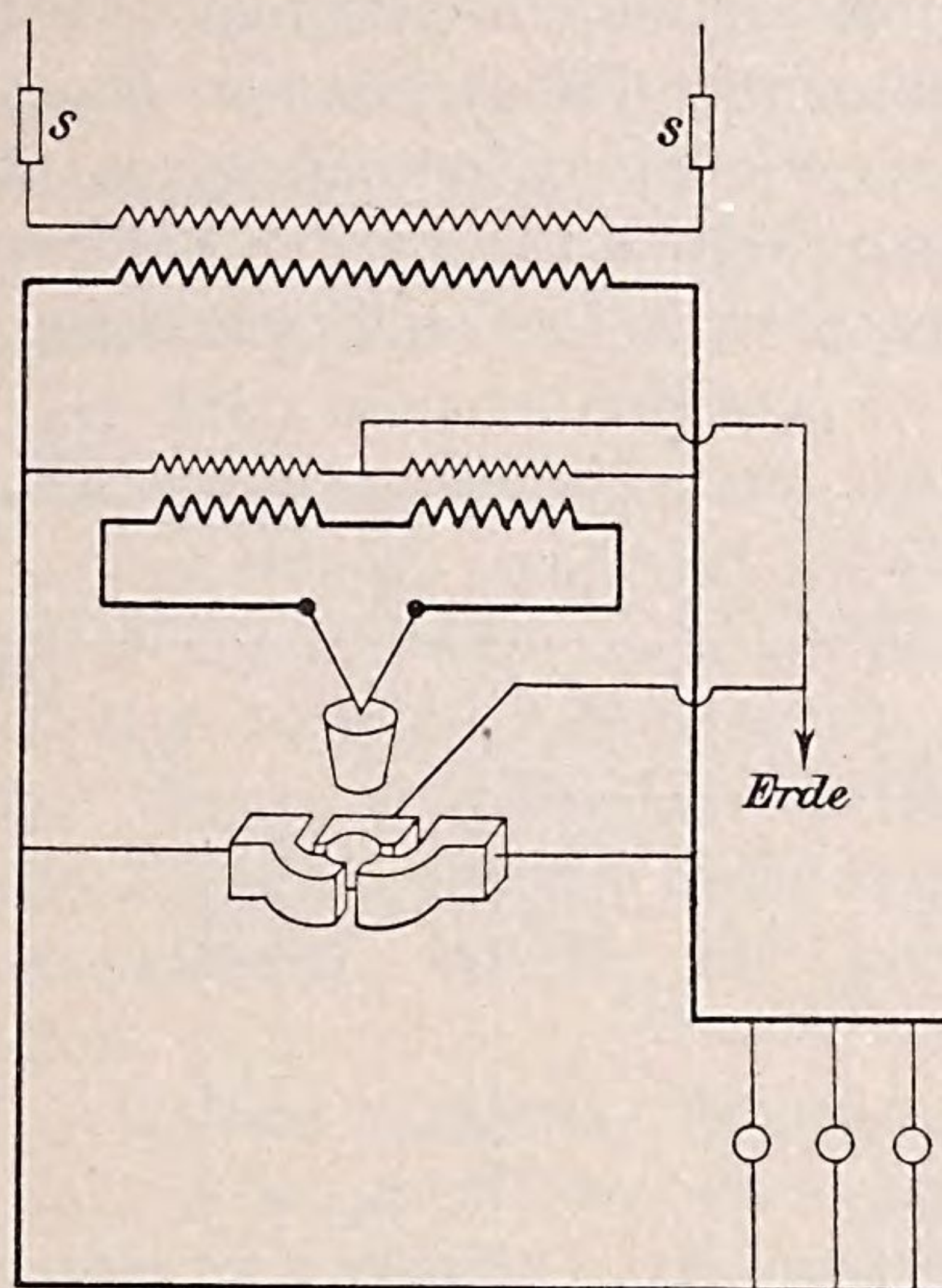


Fig. 85.

herab, schließt die Lampenleitungen kurz und legt sie gleichzeitig an Erde. Dann schmelzen die Hauptsicherungen *ss*, und der Transformator wird auf diese Weise von der Speiseleitung abgeschaltet.

Unterstationen und Einzeltransformatoren. Die wichtigste Verwendung der Transformatoren ist, wie schon der Name anzeigt, die Umsetzung einer höheren in eine niedrigere Spannung oder umgekehrt. Die Beschaffenheit der Glühlampen, sowie die Forderung absoluter Gefahrlosigkeit machen es zur Bedingung, den Strom unter niedriger Spannung (also nicht über 100 bis 200 Volt) zu verwenden, während eine hohe Spannung bei Fernleitung wegen der Ersparnis an Leitungsmaterial notwendig ist. Der Transformator bildet nur das Zwischenglied, welches die zwei Bedingungen: billige Leitung und niedrige Verbrauchsspannung, gleichzeitig zu erfüllen gestattet. Diese Anwendung der Transformatoren ist schematisch in der Skizze Fig. 86 dargestellt. *C* sind die Sammelschienen in der Centrale, *Ss* die Speiseleitungen, *TT* die Transformatoren und *VV* die Verteilungsleitungen. Die Meßapparate, Schalter etc. sind der Einfachheit halber weggelassen.

In der Skizze ist angenommen, daß jede Speiseleitung nur einen Transformator mit hochgespanntem Strom versorgt, und daß der sekundäre Strom durch ein verzweigtes Verteilungsnetz den Lampen zugeführt wird. Dabei können die zu jedem Transformator gehörigen Verteilungsleitungen von einander getrennt sein, oder sie können durch die in der Figur punktiert gezeichneten Verbindungsleitungen in Parallelschaltung angelegt werden.

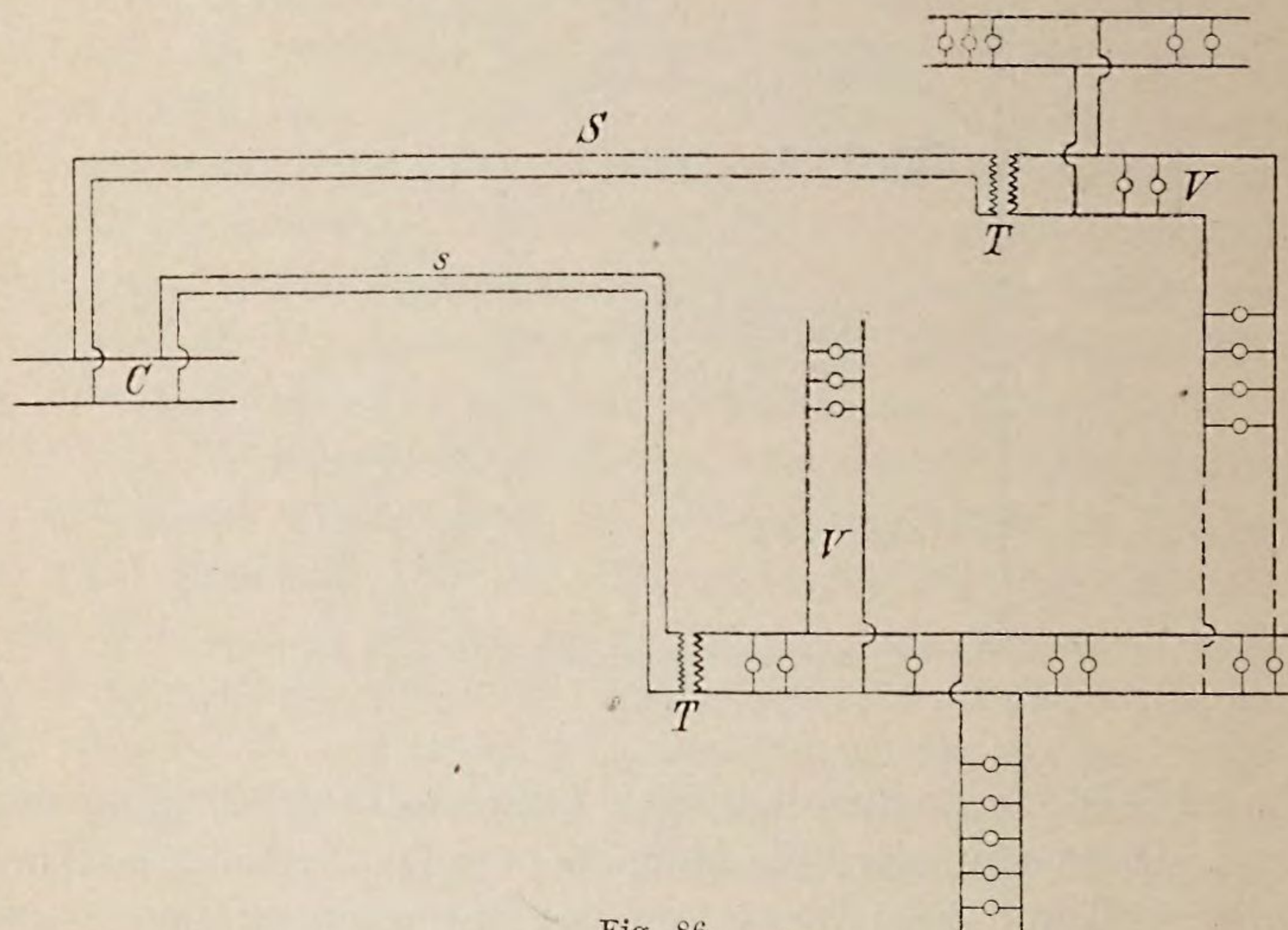


Fig. 86.

Das letztere System hat den Vorteil, daß zur Zeit geringen Bedarfes einige der Transformatoren sowohl von den Speiseleitungen als auch von den Verteilungsleitungen ganz abgetrennt werden können, und auf diese Weise der durch die Leerlaufarbeit erzeugte Verlust vermindert werden kann. Andererseits ist jedoch die Verkettung einzelner Verteilungsnetze kleineren Umfanges in ein einziges großes Netz mit der Gefahr verbunden, daß eine Störung in einem Stadtteil auch die übrigen Stadtteile in Mitleidenschaft ziehen kann. Um dieser Gefahr zu begegnen, müssen die Knotenpunkte mit Abschmelzsicherungen ausgerüstet werden. Man nennt das in Fig. 86 skizzierte System eine Transformatorenanlage mit Unterstationen. Dabei wird die Speisung lediglich durch einige wenige Hochspannungskabel, die Verteilung jedoch durch ein ausgedehntes Netz von Kabeln unter niedriger Spannung bewirkt.

Im Gegensatz zu diesem Systeme haben wir jenes der Einzeltransformatoren, wobei jedes Haus seinen eigenen kleinen Transformator erhält, die starken Verteilungskabel in den Straßen also wegfallen. Da die Verteilung hierbei unter hoher Spannung erfolgt, ist das Kupfergewicht in den Straßenleitungen bedeutend geringer als im vorigen Falle. Das ist ein Vorteil; es sind jedoch auch Übelstände mit diesem Systeme verbunden. Infolge der größeren Länge der Hochspannungsleitung und der vielen Verzweigungspunkte ist die Isolation bedeutend schwieriger, die hohe Spannung muß in die Häuser eingeführt werden, und der Kraftverlust ist größer. Wir sind nicht mehr imstande, einzelne Transformatoren bei kleiner Belastung abzutrennen, und da wir jetzt eine große Anzahl kleiner Transformatoren haben, so ist selbst unter Vollbelastung der Wirkungsgrad nicht so günstig als bei dem System mit Unterstationen, wo wir nur wenige große Transformatoren brauchen.

Ein Beispiel möge das erläutern. Es seien im ganzen 100000 50 Watt-Lampen angeschlossen. Dann muß bei dem System von Einzeltransformatoren die gesamte Leistungsfähigkeit der Transformatoren 5000 Kwt. betragen. Es kommt allerdings nie vor, daß alle 100000 Lampen gleichzeitig brennen. Erfahrungsgemäß übersteigt die Anzahl der gleichzeitig brennenden Lampen nicht 60% der Zahl der angeschlossenen Lampen, wenn man ein ganzes Stadtgebiet ins Auge faßt. Wenn es sich jedoch um ein einzelnes Haus handelt, so ist der Fall, daß alle Lampen gleichzeitig brennen, immerhin möglich. Er kommt vielleicht nur einige Male im Jahre vor; der Transformator muß aber dennoch in solcher Größe eingestellt werden, daß er für diese Ausnahmefälle ausreicht. Wir müssen also eine große Anzahl kleinerer Transformatoren (etwa 2 bis 10 Kwt.) vorsehen, deren Gesamtleistung 5000 Kwt. beträgt. Bei Unterstationen brauchen wir eine kleinere Anzahl von bedeutend größeren Transformatoren, deren Gesamtleistung nur 60% von 5000 Kwt., also 3000 Kwt. beträgt. Wie schon auf S. 80 gezeigt wurde, ist der jährliche Verlust an Stromwärme gegenüber dem Hysteresisverlust sehr klein. Wir wollen deshalb im folgenden den Vergleich zwischen beiden Systemen dadurch vereinfachen, daß wir nur den Hysteresisverlust in Betracht ziehen und dabei annehmen, daß die kleinen Transformatoren $3\frac{1}{2}\%$ und die großen 2% von ihrer vollen Belastung durch Hysteresis verlieren. Wir

nehmen der Einfachheit halber auch an, daß ein Abtrennen einzelner Transformatoren während der Zeit geringer Belastung weder bei dem einen noch bei dem anderen Systeme unternommen wird.

Wir haben dann bei dem System der Einzeltransformatoren eine jährliche Leistung von $3000 \times 600 = 1,8 \times 10^6$ Kwt.-Stunden, wobei wir annehmen, daß jede Lampe im Durchschnitt während 600 Stunden im Jahre gebraucht wird. Der Hysteresisverlust ist

bei Einzeltransformatoren $5000 \times \frac{3,5}{100} = 175$ Kwt., also im Jahre

$175 \times 8760 = 1,53 \times 10^6$ Kwt.-Stunden. Die gesamte den Transformatoren in einem Jahre zugeführte Arbeit ist also, abgesehen von der Stromwärme, $(1,8 + 1,53) 10^6 = 3,33 \times 10^6$ Kwt.-Stunden. Der jährliche Wirkungsgrad ist $1,8 : 3,33 = 54\%$; in Wirklichkeit jedoch noch etwas kleiner wegen der Stromwärme in den Transformatoren und den Verlusten in den Leitungen.

Im Falle von Unterstationen haben wir die gleiche Leistung, aber erheblich weniger Verluste. An Hysteresis geht verloren

$3000 \times \frac{2}{100} = 60$ Kwt. oder im Jahre 525 600 Kwt.-Stunden. Die

zugeführte Energie beträgt also jährlich $(1,8 + 0,526) 10^6 = 2,326 \times 10^6$ Kwt.-Stunden und der jährliche Wirkungsgrad $1,8 : 2,326 = 77,4\%$; in Wirklichkeit jedoch aus den oben angeführten Gründen ebenfalls etwas kleiner. Rechnen wir in beiden Fällen etwa 2% für Stromwärme und Leitungsverluste, so stellt sich der Vergleich der beiden Systeme, wie folgende Tabelle zeigt:

	Einzel- Transformatoren	Unter- Stationen
Jährlicher Wirkungsgrad %	52	75
Gesamtleistung in Kwt.- Stunden	1 800 000	1 800 000
Leistung der Centrale in Kwt.-Stunden	3 460 000	2 400 000
Jährlich verlorene Arbeit in Kwt.-Stunden	1 660 000	600 000

Rechnet man die Selbstkosten der Kwt.-Stunde in der Centrale zu 10 Pf., so beläuft sich der jährliche, vornehmlich durch Hysteresis erzeugte Geldverlust auf M. 166 000 bzw. M. 60 000. Die Differenz ist also M. 106 000, um welche Summe der Betrieb mit Einzeltransformatoren teurer ist als mit Unterstationen. Dagegen

ist die Anlage des ersteren Systemes billiger. Wir wollen nun berechnen, um wie viel dieses System billiger sein muß, damit es sich wirtschaftlich günstiger stellt, als jenes mit Unterstationen. Soll das der Fall sein, so müssen die Unterhaltungskosten, Verzinsung und Amortisation der Kabel und Transformatoren einen Unterschied von mehr als M. 106000 zu gunsten des Systems von Einzeltransformatoren aufweisen. Wir können für diese Posten bei Transformatoren 10% und bei Kabeln 15% der Anlagekosten in Rechnung stellen. Die Anschaffungskosten kleiner Transformatoren sind ungefähr M. 70 und jene von großen ungefähr M. 55 pro Kilowatt. Es kosten also die Transformatoren für das System

mit Einzeltransformatoren	M. 350000	oder jährlich	M. 35000
» Unterstationen	» 165000	»	» 16500

Der Unterschied von M. 18500 ist zu gunsten der Unterstationen zu den M. 106000 zu addieren. Das gibt M. 124500. Diese Summe muß bei wirtschaftlicher Gleichwertigkeit beider Systeme 15% der Mehrausgaben für Kabel beim System von Unterstationen ausmachen. Diese Mehrausgabe beträgt also

$$124500 : 0,15 = \text{M. } 830000;$$

also etwas über M. 8 pro angeschlossene Lampe. Zeigt nun die Kostenberechnung, daß das Kabelnetz bei Unterstationen um mehr als M. 8 pro anzuschließende Lampe teurer ist, als bei Einzeltransformatoren, so empfiehlt es sich, letzteres System zu wählen. Hätten wir einen kleineren Prozentsatz als 15% für Abschreibung angenommen, so hätten wir auch eine größere Summe als M. 8 erhalten. Ebenso wäre diese Summe größer ausgefallen, wenn wir die Selbstkosten für die Kwt.-Stunde zu mehr als 10 Pf. gerechnet hätten. Ferner ist klar, daß die Kosten für Kabel in beiden Systemen und mithin auch ihr Unterschied wächst, wenn die Leistung der Centrale klein ist und die Lampen nicht dicht zusammengedrängt, sondern zerstreut liegen. Wir kommen also zu den folgenden allgemeinen Schlüssen:

Stromverteilung mit Einzeltransformatoren ist wirtschaftlich günstiger als mittels Unterstationen unter folgenden Umständen: Betriebskraft billig, Anlage klein, Lampen weit zerstreut, Kabel teuer und Abschreibung für dieselben hoch.

Unterstationen sind vorzuziehen unter folgenden Umständen: Betriebskraft teuer, Anlage groß, Lampenverteilung dicht, Kabel billig und Abschreibung für dieselben gering.

Spannungserhöher. Bei Wechselstromanlagen mit langen Speiseleitungen werden manchmal außer den Transformatoren auf den Unterstationen noch kleine Transformatoren in der Centrale selbst angewendet, deren Aufgabe es ist, die Spannung in jeder Speiseleitung um genau den Betrag zu erhöhen, welcher dem

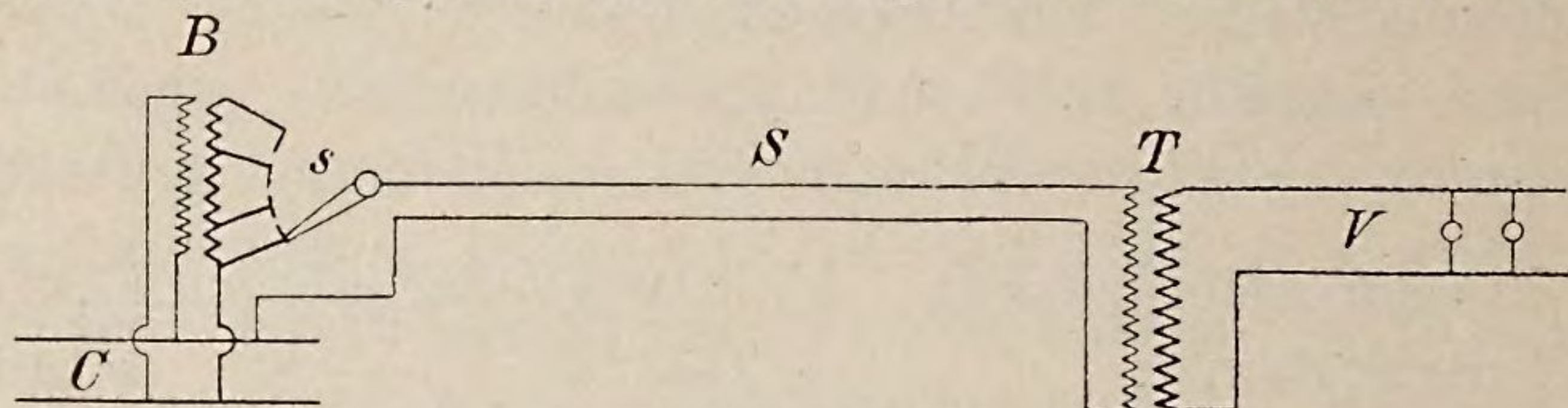


Fig. 87.

ohmischen Spannungsabfall in der Speiseleitung und den Verteilungsleitungen und dem Spannungsabfall im Transformator entspricht. Diese Spannungserhöher sind gleichzeitig von Stillwell in Amerika und dem Verfasser in England erfunden worden und sind unter dem Namen »Booster« bekannt. Die Anordnung dieses Apparates ist in Fig. 87 dargestellt.

C sind die Sammelschienen in der Centrale, *S* ist eine der Speiseleitungen, *T* der dazugehörige Transformator und *V* die von ihm mit Strom versorgte Verteilungsleitung. Der Spannungserhöher *B* hat eine Primärwicklung, die unmittelbar an die Sammelschienen angeschlossen ist. Die Sekundärwicklung ist in Gruppen abgeteilt und durch einen Mehrfachschalter *s* mit dem einen Leiter *S* verbunden, während der andere Leiter unmittelbar an die betreffende Sammelschiene angeschlossen ist. Die Meß- und Kontroll-Apparate sind, wie früher, der Einfachheit halber in der Skizze weggelassen. Der Zusatz-Transformator *B*, welcher die Spannungserhöhung bewirkt, wird also dauernd magnetisiert, und seine sekundäre Wickelung ist so bemessen, daß sie gerade hinreicht, den größten möglichen Spannungsverlust auszugleichen. Bei Vollbelastung der betreffenden Speiseleitung werden durch Einstellung des Schalthebels *s* auf den obersten Kontakt alle Windungen der sekundären Spule mit der Speiseleitung in Serie geschaltet. Bei geringerer Belastung wird der Hebel *s* entsprechend herabgerückt, so daß nunmehr nur ein Teil der sekundären Spule zur Wirk-

samkeit kommt. Steht der Hebel in der gezeichneten Stellung, so ist die sekundäre Spule ganz ausgeschaltet, und die Spannung am Anfang der Speiseleitung ist genau gleich jener, welche zwischen den Sammelschienen herrscht. Diese Stellung des Hebels entspricht dem Minimalbedarfe an Strom; steigt der Bedarf, so wird der Hebel schrittweise auf die höheren Kontakte gebracht, so daß die Spannung in der Verteilungsleitung bei allen Belastungen nahezu konstant bleibt. Da der Spannungsabfall von der Stromstärke in der Speiseleitung abhängt, so kann die Einstellung des Kontakthebels nach den Anzeigen des Ampèremeters in der Speiseleitung von Hand erfolgen; oder es können auch Prüfdrähte von der Unterstation nach der Centrale zurückgeführt und an ein Voltmeter angeschlossen werden, nach dessen Anzeigen man den Hebel einstellt. In diesem Falle kann mittels Relais und Elektromotor die Einstellung des Schalters auch automatisch erfolgen. Es ist wichtig, zu beachten, daß der Schalthebel wie bei Zellenschaltern aus zwei isolierten Teilen bestehen muß, welche durch einen ohmschen oder induktiven Widerstand verbunden sind, damit beim Übergang von einem Kontakt auf den anderen weder Stromunterbrechung noch Kurzschluß einer sekundären Windungsgruppe eintreten kann.

Die Notwendigkeit, den ganzen Speisestrom durch einen Mehrfachschalter zu senden, bringt eine gewisse Verminderung der Betriebssicherheit mit sich, denn wenn dieser Schalter in Unordnung gerät, wird die ganze Speiseleitung und der am entfernten Ende angeschlossene Transformator dadurch außer Betrieb gesetzt. Um dieser Gefahr zu begegnen, kann man den Spannungserhöher in einer etwas anderen Form anordnen, welche in Fig. 88 dargestellt ist. Dabei wird die Hauptleitung nicht durch einen Schalter unterbrochen, sondern sie ist fest mit der Sekundärspule des Spannungserhöhers verbunden, während der Mehrfachschalter in die Primärspule verlegt wird. Die Primärspule ist nun in die Gruppen *a*, *b*, *c*, *d*, *e* geteilt. Die erste Gruppe (*a*) muß noch so viel Windungen enthalten, daß die Induktion die durch die Erhitzung des Apparates gegebenen Grenzen nicht übersteigt. Für die tiefste Stellung des Schalthebels *s* ist die Induktion ein Maximum und mithin auch die in der Sekundärspule des Apparates induzierte EMK ein Maximum. Stellen wir den Hebel höher, so nimmt die primäre Windungszahl zu, die Induktion also entsprechend ab, und die

Spannungserhöhung ist geringer. Es ist also auch hier durch entsprechende Einstellung des Schalthebels möglich, die Verteilungsspannung mit einer für die Praxis genügenden Annäherung konstant zu halten. In dieser Anordnung des Spannungserhöhers wird der

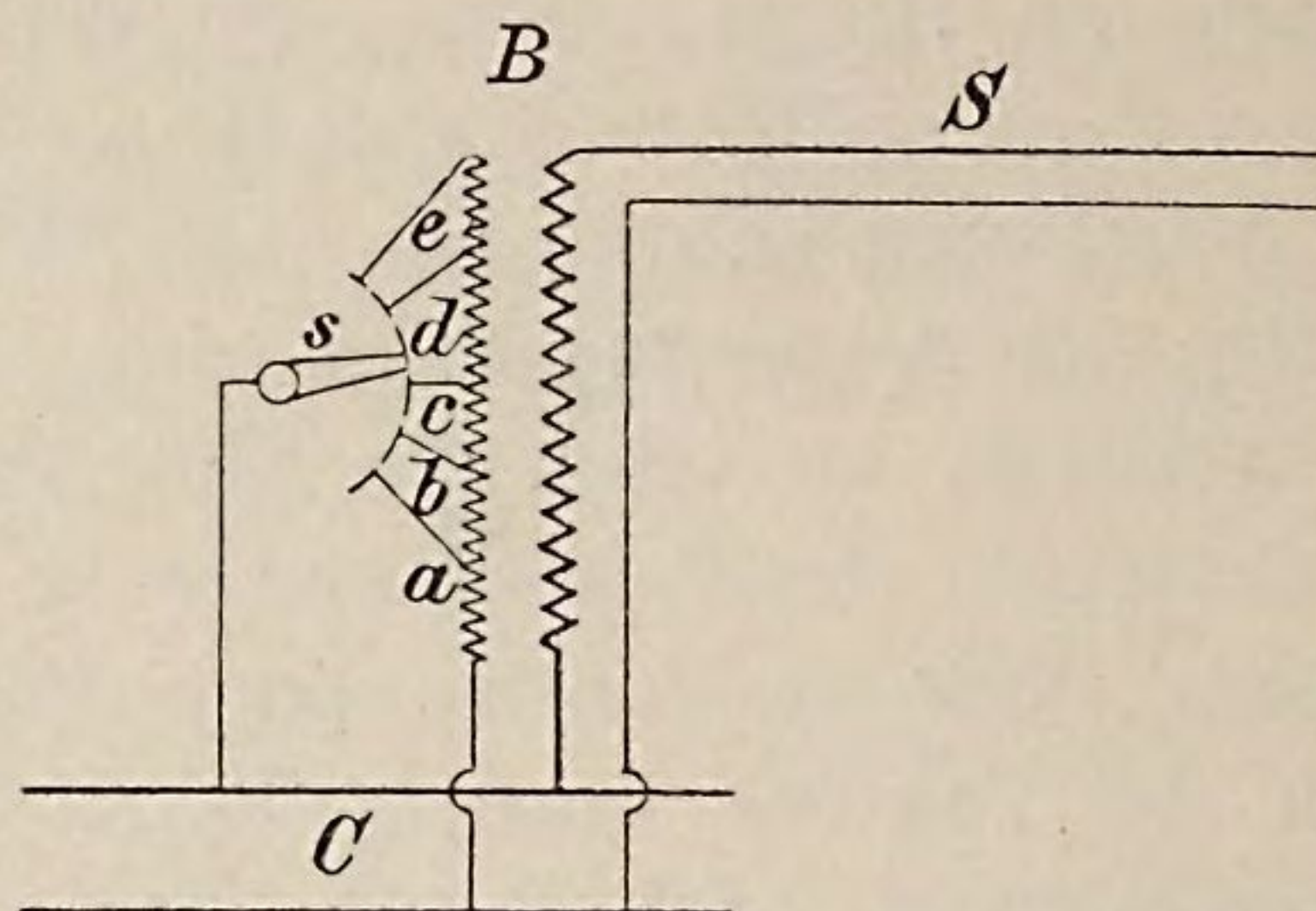


Fig. 88.

Hauptstromkreis S durch keinerlei Kontakte oder Schalter unterbrochen. Der Schalter ist in den Primärkreis des Transformators B eingeführt, braucht also nur für eine geringe Stromstärke gebaut zu sein. Er ist also billiger herzustellen, als im andern Falle, Fig. 87. Dagegen wird der Transformator selbst etwas größer, denn die erste Gruppe a muß so viel Windungen enthalten, als die ganze Spule in Fig. 87, und die anderen Gruppen, die allerdings aus dünnerem Draht bestehen können, kommen noch dazu. Die Konstruktion hat jedoch den großen Vorteil, daß ein Unfall am Schalter die Speiseleitung nicht unterbricht.

Endlich gibt es noch eine dritte Konstruktion von Spannungserhöher, bei welcher weder im sekundären, noch im primären Stromkreise Schalter nötig sind. Die Anordnung des Apparates gleicht einer gewöhnlichen zweipoligen Dynamo. Das Magnetgestell sowohl, als auch der Ankerkern bestehen aus Blechen, und die Feldspulen PP Fig. 89 bilden die primäre Wickelung, welche unmittelbar an die Sammelschienen angeschlossen ist. Die sekundäre Wickelung S ist auf dem Anker angebracht und wird durch biegsame Leitungen mit der Speiseleitung in Serie geschaltet. Auf der Ankerwelle ist ein Schneckenrad festgekeilt, das durch eine Schnecke entweder von Hand oder automatisch durch einen Winkel von 90° gedreht werden kann. Auf diese Weise kann die Winkelstellung der Spule S , der gewünschten Spannungserhöhung gemäß bewirkt werden. Stehen die Spulen

vertikal, so geht die größte Zahl der Kraftlinien durch dieselben, die Spannungserhöhung ist also ein Maximum. Dreht man nun mittels des Schneckengetriebes den Anker um 90° , so daß die Spulen horizontal zu stehen kommen, so gehen die Kraftlinien bei den Spulen vorbei, nicht aber durch dieselben. Die Spannungs-

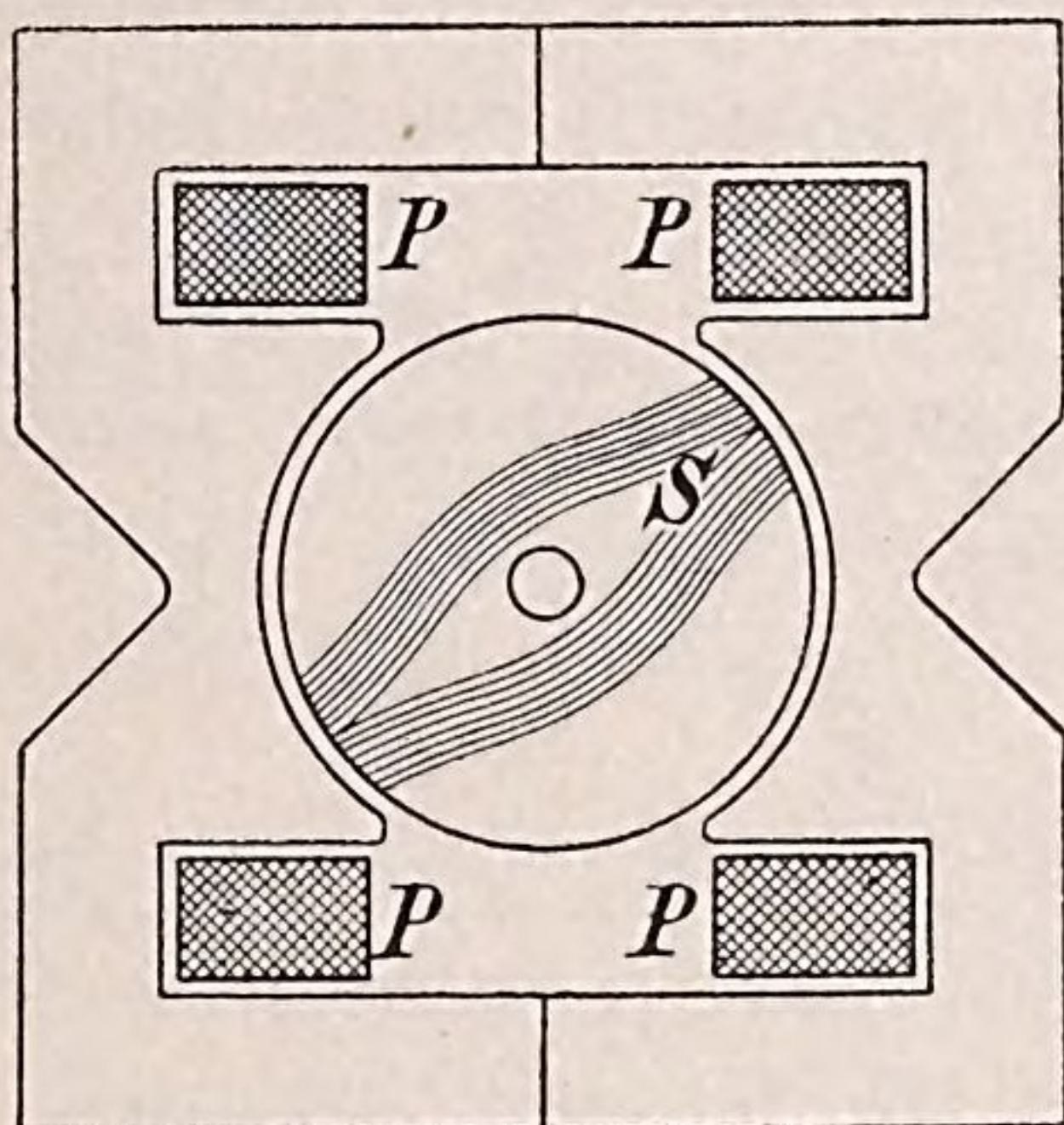


Fig. 89.

erhöhung ist dann Null. Bringt man die Spulen in eine Zwischenstellung, so geht nur ein Teil der Kraftlinien vorbei und der andere Teil geht durch, bewirkt also eine gewisse Spannungserhöhung. Verglichen mit den früher beschriebenen Konstruktionen, hat Fig. 89 zwei Vorteile. Erstens haben wir in beiden Stromkreisen nur feste Verbindungen und keine Schalter, die in Unordnung geraten können, und zweitens läßt sich die Spannung auf rein mechanischem Wege genau auf den richtigen Wert einstellen, anstatt sprungweise und nur annähernd, wie das bei Anwendung eines Schalters der Fall ist.

Serienschaltung. Transformatoren lassen sich auch mit Vorteil bei Serienschaltung von Lampen in Stromkreisen von konstanter Stromstärke verwenden. Wenn wir die Lampen selbst in Serie schalten würden, so müßte die Isolation jeder einzelnen Lampe der gesamten Spannung entsprechen, was bei einigermaßen ausgedehnten Stromkreisen praktisch nicht zu erreichen ist. Wenn wir jedoch die Lampen durch Serien-Transformatoren speisen, so braucht nur die Isolation der Transformatoren der gesamten Spannung zu entsprechen; jene der Lampen dagegen braucht nur so gut zu sein, daß sie die Lampenspannung aushalten kann. Die Anordnung ist in Fig. 90 skizziert. *T* sind die Transformatoren

und L die Lampen. Die Rückleitung ist nicht gezeichnet. Diese Anordnung hat jedoch einen Übelstand. Wenn durch Herausfallen der Kohlen oder aus irgend einem anderen Grunde der sekundäre Stromkreis einer Lampe unterbrochen wird, so steigt bei Transformatoren gewöhnlicher Konstruktion die Induktion im Eisen und die primäre Gegenspannung sehr bedeutend an. Der Primärstrom muß, der anderen Lampen wegen, konstant erhalten werden,

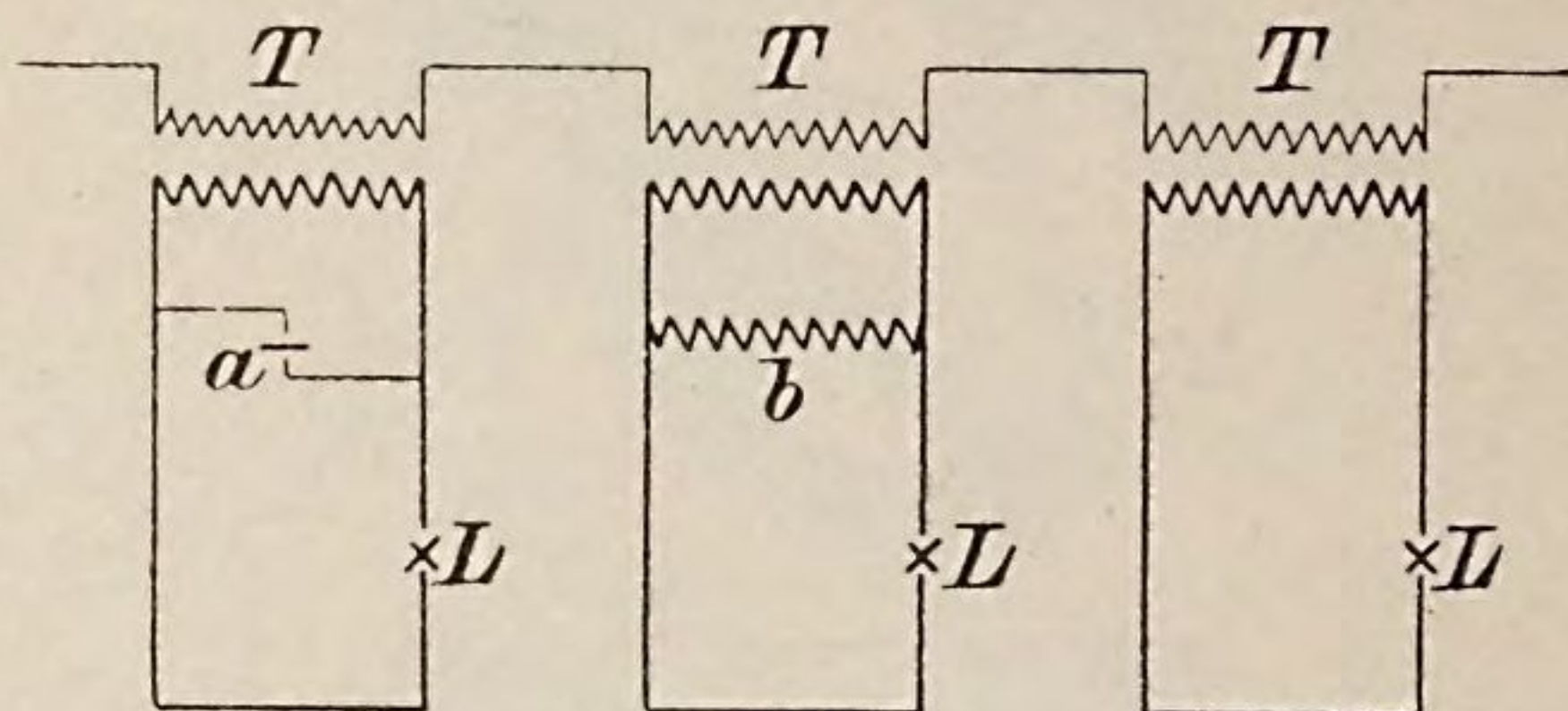


Fig. 90.

was nur möglich ist, indem man die Spannung der Primärmaschine entsprechend erhöht. Dabei muß sich natürlich der außer Betrieb gesetzte Transformator sehr bedeutend erhitzen und schließlich verbrennen. Um dieses zu vermeiden, ist es notwendig, dem Sekundärstrom einen anderen Weg als durch die Lampe zu geben. Das kann nun auf zwei Arten geschehen. Wir können wie bei a eine automatische Sicherung einsetzen, bestehend aus zwei Elektroden, die im normalen Zustand durch ein dünnes Blättchen aus Glimmer getrennt sind. So lange der Lampenstrom fließt, herrscht zwischen diesen Elektroden nur die normale Lampenspannung, der das Glimmerblättchen vollkommen gut widerstehen kann. Wird der Lampenstrom jedoch unterbrochen, so steigt die Spannung, und das Glimmerblättchen wird durchgeschlagen. Die Elektroden berühren sich und schließen die sekundäre Spule kurz. Damit ist die Gefahr eines Verbrennens des Transformators beseitigt.

Eine andere Methode, dasselbe Ziel zu erreichen, besteht in der Anwendung einer Drosselspule b , die der Lampe parallel geschaltet wird. Eine Drosselspule ist ein Transformator mit nur einer Wickelung. Durch diese Spule fließt ein Strom, welcher der Klemmenspannung (in diesem Falle also der Lampenspannung) proportional ist und ihr in der Phase um nahezu 90° nacheilt. Die in der Drosselspule verbrauchte Energie ist lediglich Hysteresis und Stromwärme, nicht das Produkt von Strom und Spannung. Durch

gute Konstruktion ist es also immer möglich, die Drosselspule so einzurichten, daß kein erheblicher Effektverlust eintritt, wenngleich Strom scheinbar verloren geht. Ein Beispiel möge zur Erläuterung dienen. Nehmen wir an, die Lampe brauche 35 Volt und 20 Ampère und habe einen Leistungsfaktor von 80%. Die wirklich verbrauchte Energie ist also 560 Watt. Die Drosselspule sei so konstruiert, daß bei 35 Volt auch 20 Ampère durchgehen, und zwar unter einem Effektverlust von 20 Watt. Der Leistungsfaktor ist also $20 : (35 \times 20) = 2,85\%$. Zeichnet man nun das Vektordiagramm, so findet man, daß der vom Transformator zu liefernde Strom 36 Ampère beträgt. Wird nun die Lampe ausgeschaltet, so muß die Drosselspule die ganzen 36 Ampère durchlassen, was eine Spannungserhöhung auf $35 \times \frac{36}{20} = 63$ Volt hervorbringt. Der Transformator wird also in dem gleichen Verhältnis magnetisch stärker beansprucht, nämlich um 80%. Diese Mehrbeanspruchung ist jedoch nicht so stark, als daß eine Beschädigung zu befürchten wäre.

Es kommt manchmal vor, daß ein Transformator zur Speisung einer Anzahl in Serie geschalteter Lampen verwendet wird, wobei möglichste Konstanthaltung des Stromes bei veränderlicher Lampenzahl angestrebt wird. Dieses Ziel ist ohne weiteres erreichbar, wenn der Primärstrom konstant gehalten wird und die Primärwickelungen der einzelnen Transformatoren in Serie geschaltet werden. Nun bedingt aber diese Schaltung die Anwendung von besonderen Schutzmitteln, wie oben erwähnt. Will man letztere vermeiden, so muß die Primärwicklung im Nebenschluß zum Primärstromkreis angeordnet werden, und dann würde sich ein Transformator mit sehr wenig magnetischer Streuung nicht eignen, denn ein solcher hält die Spannung konstant, nicht aber die Stromstärke. Bei Serienschaltung der Lampen ist es aber gerade die Stromstärke, welche konstant erhalten werden soll, während die Spannung im Verhältnis mit der Zahl der eingeschalteten Lampen variieren muß. Dieser Bedingung kann nun annähernd genügt werden, wenn man den Transformator absichtlich so baut, daß er ziemlich viel magnetische Streuung hat. Bei einer solchen Anordnung, Fig. 91, ist der Eisenkörper des Transformators mit Ansätzen *a b* versehen, zwischen denen ein bedeutendes Streufeld entsteht, wenn die beiden Spulen Strom führen. Die Primärspule ist mit der Speiseleitung *s* im Nebenschluß verbunden, und die

sekundäre Spule ist mit der Lampenleitung L verbunden. Die Lampen sind alle in Serie geschaltet; jede einzelne kann jedoch kurz geschlossen und so außer Betrieb gesetzt werden. Es ist ohne weiteres klar, daß bei unterbrochenem sekundären Stromkreis das Streufeld zwischen a und b nur unbedeutend sein kann,

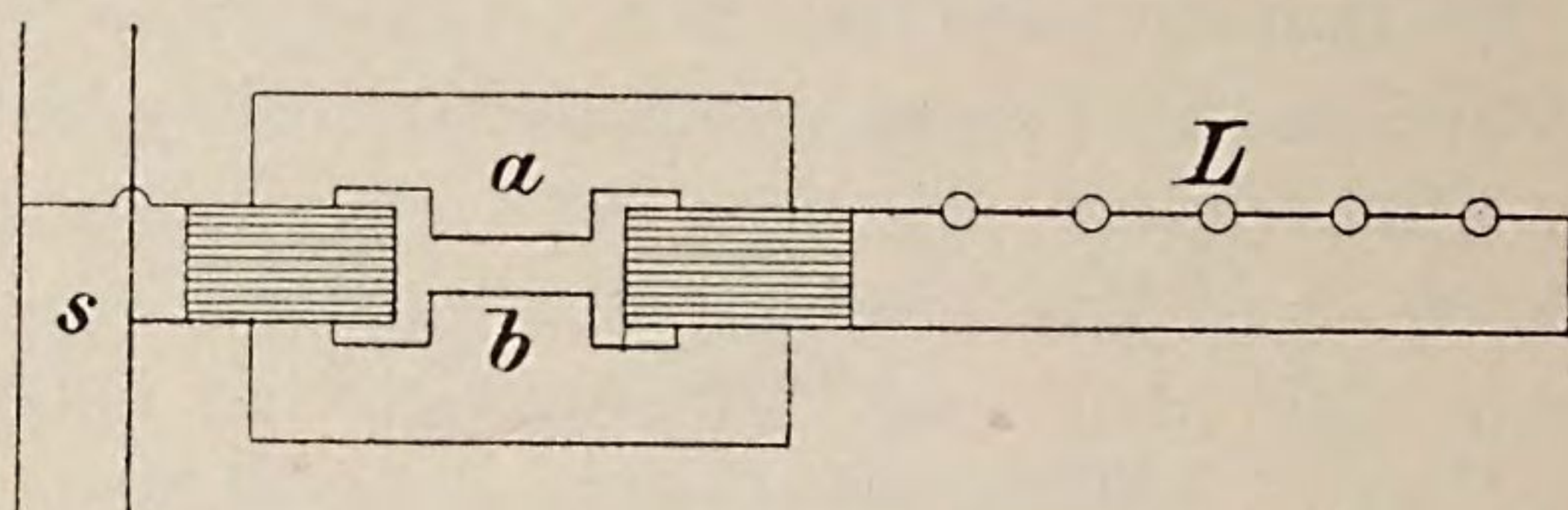


Fig. 91.

denn die Kraftlinien können ihren Weg ungehindert durch die sekundäre Spule nehmen. Fließt jedoch in dieser Spule ein Strom, so werden die Kraftlinien zurückgestaut und müssen ihren Weg über die Ansätze a b und die zwischenliegende Luftschicht nehmen. Je stärker der Strom, desto mehr Kraftlinien

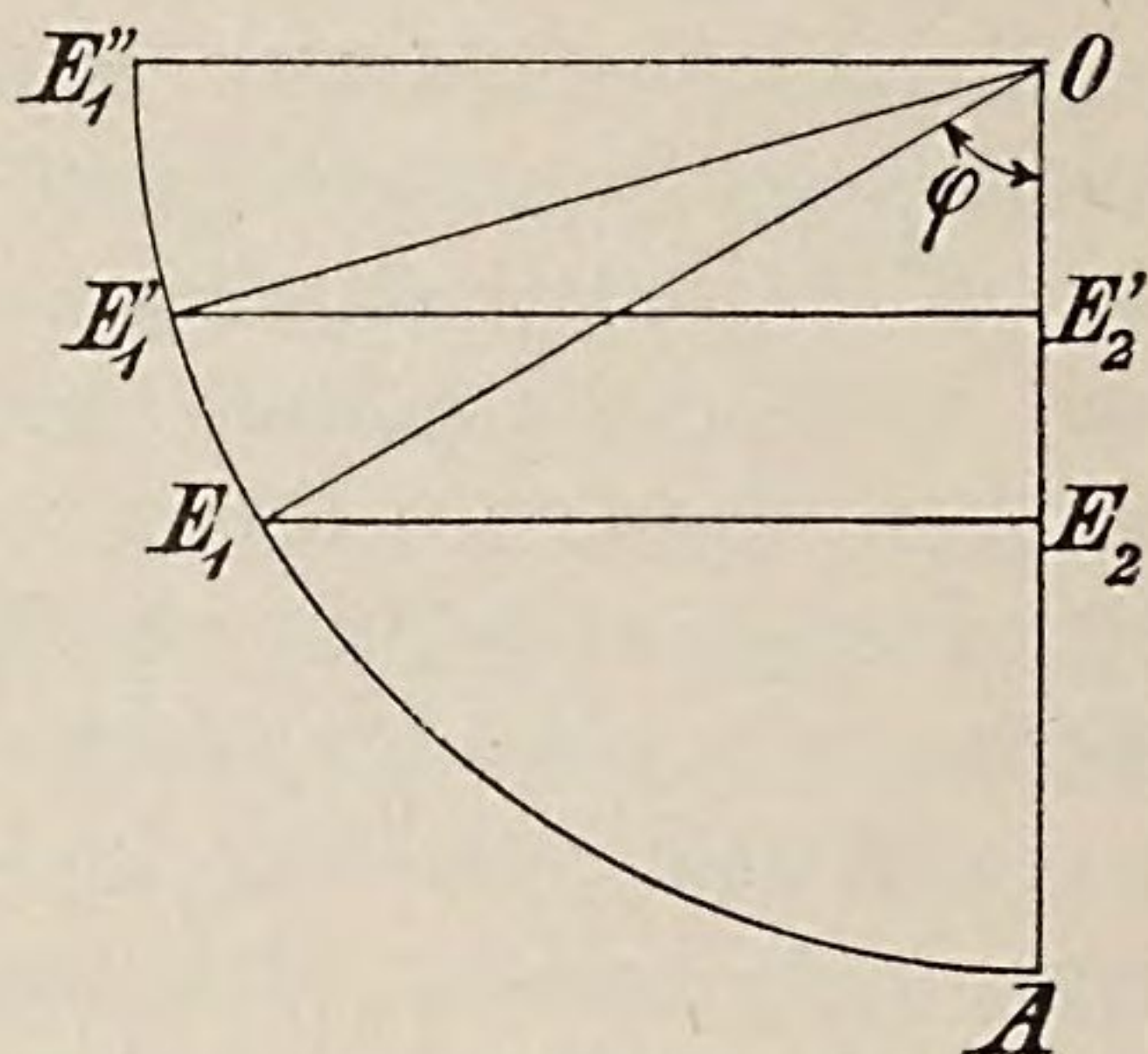


Fig. 92.

werden zurückgestaut, und desto weniger gehen durch die sekundäre Spule, d. h. desto kleiner ist die im sekundären Stromkreise induzierte EMK. Schließt man nun eine der Lampen kurz, so würde bei konstanter EMK die Stromstärke infolge der Verminderung im Widerstande steigen. Das Anwachsen der Stromstärke bewirkt jedoch eine Vergrößerung des Streufeldes und eine entsprechende Verminderung der EMK, und es wird auf diese Weise eine Regulierung auf konstante Stromstärke in der Sekundärspule wenigstens annähernd erzielt. Die Grenzen, zwischen welchen dies stattfindet, lassen sich leicht durch ein Vektordiagramm, Fig. 92,

festsetzen. Es sei OA der Strom und OE_2 die sekundäre Klemmenspannung bei voller Belastung (maximale Lampenzahl). Die Belastung ist als induktionslos vorausgesetzt. Es sei ferner E_2E_1 der Vektor der durch Selbstinduktion und Widerstand bedingten EMK, so ist OE_1 der Vektor der primären Klemmenspannung. Die Länge der Linie E_2E_1 ist proportional der Stromstärke. Werden nun so viele Lampen kurz geschlossen, daß nur die halbe EMK zum Betriebe der Lichtleitung nötig ist, so rückt der Punkt E_2 nach E_2' und E_1 nach E_1' . Der Strom ist jetzt der Strecke $E_2'E_1'$ proportional, also etwas größer als früher. Wird die gesamte Lichtleitung kurzgeschlossen, so fällt E_2 mit O zusammen, und der Strom ist OE_1'' proportional. Das Anwachsen der Stromstärke von Vollbelastung bis auf Kurzschluß ist also durch das Verhältnis der Strecken E_2E_1 und OE_1'' gegeben, und es ist sofort klar, daß wir durch entsprechende Konstruktion des Transformators auf starke Streuung (wobei φ groß wird) den prozentualen Zuwachs des Stromes bei abnehmender Belastung beliebig klein machen können. Allerdings wird dabei der Transformator verhältnismäßig groß und kostspielig. Auch muß sein Wirkungsgrad geringer ausfallen, als bei der Konstruktion mit möglichst wenig Streuung, welche sich für Parallelbetrieb der Lampen eignet. Es ist auch zu bemerken, daß bei Lampen, welche Selbstinduktion haben, diese Art der Regulierung auf konstante Stromstärke viel weniger tauglich ist, wie man sofort aus dem Umstande erkennt, daß im Diagramm Fig. 92 der Vektor OE_2 nicht mehr senkrecht, sondern schräg zu stehen kommt, der Unterschied zwischen den Längen E_2E_1 und OE_1'' also bedeutend größer ausfällt.

Drosselspulen. Bei Lampen, die in Parallelschaltung arbeiten, bilden Drosselspulen ein sehr bequemes Mittel, die Spannung der Lampe entsprechend zu regulieren. Erfordert die Lampe eine kleinere Spannung als jene ist, welche zwischen den Zuleitungsdrähten herrscht, so kann man durch Vorschalten einer Drosselspule die überschüssige Spannung gewissermaßen abdämpfen. Allerdings ließe sich der gleiche Zweck auch durch einen Vorschaltwiderstand erreichen, aber dann unter einem bedeutenden Energieverlust, welcher gleich ist dem Produkt von Strom und abgedämpfter Spannung. Bei Anwendung einer Drosselspule anstatt eines Widerstandes ist der scheinbare Energieverlust gleich diesem Produkt, der wirkliche jedoch wegen der Phasenverschiebung viel

kleiner. Die Einrichtung ist in Fig. 93 dargestellt. V ist die Verteilungsleitung, D die Drosselspule und L die Lampe. Fig. 94 ist

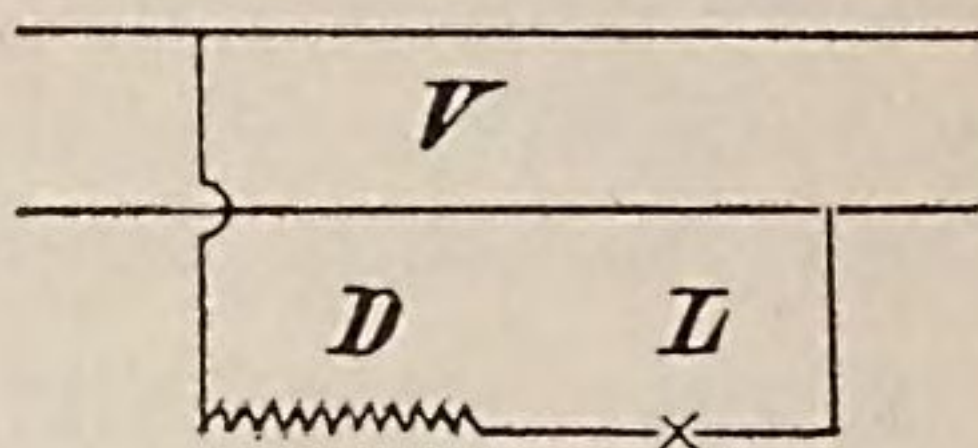


Fig. 93.

das zugehörige Vektordiagramm. OI ist der Strom und OE_w die Wattkomponente der Spannung. Die Strecke OE_1 stellt die Spannung dar, welche zwischen den Klemmen der Lampe herrscht,

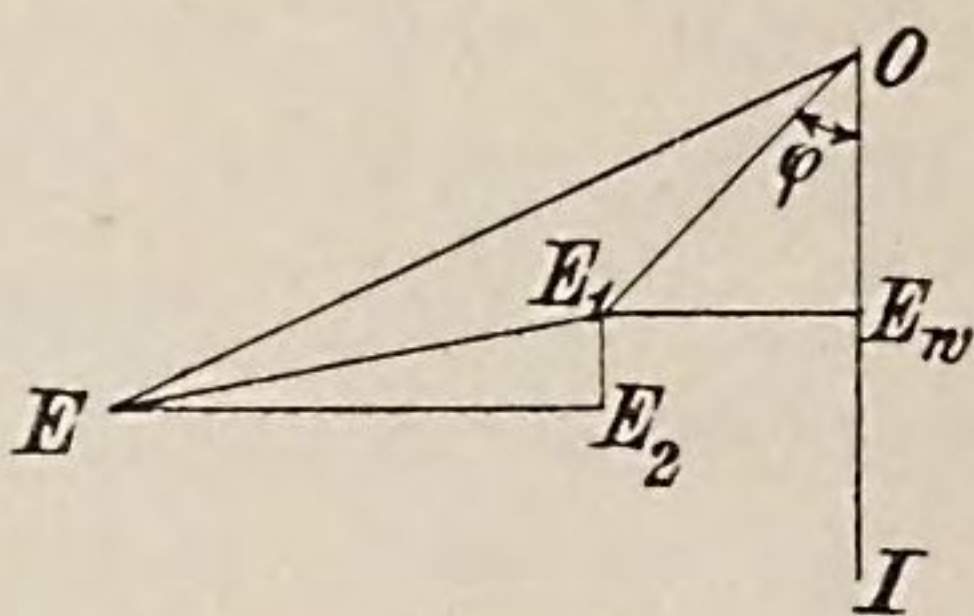


Fig. 94.

wobei φ die Phasenverschiebung ist. Bei einer Glühlampe würde E_1 und E_w zusammenfallen, wobei $\varphi = 0$. Bei einer Bogenlampe findet Phasenverschiebung statt, und OE_1 ist größer als OE_w . Die zur Deckung der Energieverluste in der Drosselspule nötige Spannung ist durch den Vektor E_1E_2 dargestellt und ihre gegen elektromotorische Kraft durch E_2E . Der Vektor E_1E stellt somit die Spannung zwischen den Klemmen der Drosselspule dar, und OE ist der Vektor der Spannung zwischen den Verteilungsleitungen.

Ausgleichsspulen. Die in Fig. 93 skizzierte Anordnung findet Anwendung, wenn eine Bogenlampe an einen Wechselstromkreis angeschlossen werden soll, dessen Spannung die Betriebsspannung der Lampe übersteigt. Für eine Wechselstromlampe genügt eine Spannung von 30 bis 35 Volt. Man könnte also drei solcher Lampen in Serie an eine Leitung von 110 Volt anschließen. Wird jedoch nur eine Lampe benötigt, so muß die überschüssige Spannung in der oben erläuterten Weise durch eine Drosselspule abgedämpft werden. Nehmen wir nun den Fall an, daß zwischen den zwei Drähten der Leitung gerade die Spannung herrscht, welche zwei in Serie geschaltete Bogenlampen brauchen, also etwa 65 Volt. Um die eine oder die andere der Lampen allein zu brennen, können wir die in Fig. 95 gezeichnete Anordnung ver-

wenden. D_1 und D_2 sind zwei übereinanderliegende Windungen mit gemeinschaftlichem Eisenkern. In der Zeichnung sind sie der Einfachheit halber nebeneinander gezeichnet. Die beiden Spulen sind im Punkte o verbunden, und die Richtung der Wickelung möge derart sein, daß ein in D_1 von links nach rechts fließender Strom in D_2 eine von rechts nach links wirkende EMK induziert und umgekehrt. Denken wir uns nun eine der Lampen, z. B. L_1 ,

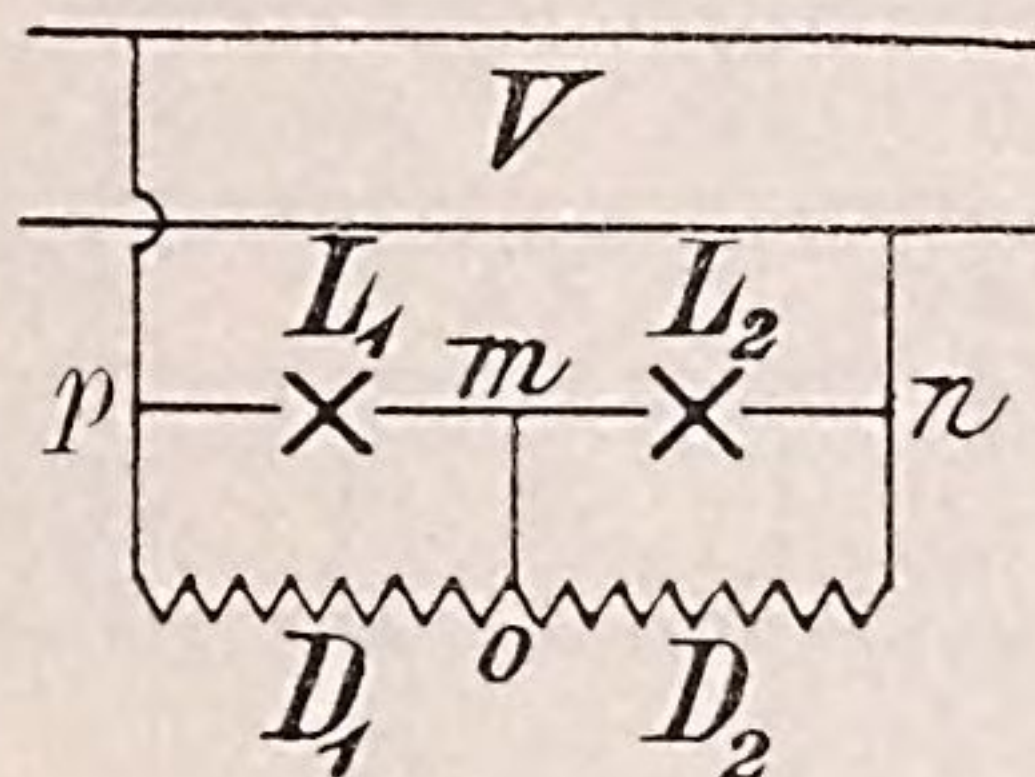


Fig. 95.

ausgeschaltet, so fließt der Strom durch D_1 zunächst bis zum Punkte o und hat dann zwei Wege, den einen durch D_2 und den andern durch die Lampe L_2 . Es ist sofort klar, daß der erste Weg für den Strom unpassierbar ist; denn die in D_2 induzierte EMK ist seiner Richtung entgegengesetzt und erzeugt selbst einen Strom, der auch durch die Lampe fließt. Die zwei Spulen können also als ein Transformator mit dem Umsetzungsverhältnis 1:1 angesehen werden, wobei D_1 die primäre und D_2 die sekundäre Wickelung ist. Nehmen wir an, daß die Lampen 12 Ampère Strom brauchen, dann würde bei einem Wirkungsgrad des Transformators von 100% durch D_1 ein Strom von 6 Ampère fließen und durch D_2 ein genau gleicher Strom, aber in entgegengesetzter Richtung. Die zwei Ströme addieren sich in o , und die Lampe L_2 erhält einen Strom von 12 Ampère. Bei n teilt sich dieser Strom wieder, indem 6 Ampère zur Spule D_2 fließen und 6 Ampère zum anderen Pol der Leitung. Da der Wirkungsgrad des Apparates jedoch etwas kleiner als 100% sein muß, so wird D_2 etwas weniger als die Hälfte des Lampenstromes beitragen oder, was auf das Gleiche hinauskommt, die Leitung muß etwas mehr als den halben Lampenstrom liefern. Der Mehrbetrag dient zur Deckung der Verluste.

Es ist also möglich, durch Parallelschaltung eines Transformators zu den zwei Lampen dieselben von einander unabhängig

zu machen, trotzdem sie zu einander in Serie geschaltet sind. Der Transformator hat drei Klemmschrauben $p o n$, von denen o für beide Spulen gemeinschaftlich ist. Er wirkt hier als eine Art elektromagnetischer Ausgleichsvorrichtung zwischen zwei Stromkreisen, und das gleiche Prinzip läßt sich auch auf mehr als zwei Stromkreise anwenden. So sind z. B. in Fig. 96 drei Lampen in Serie geschaltet und an die Verteilungsleitung V angeschlossen.

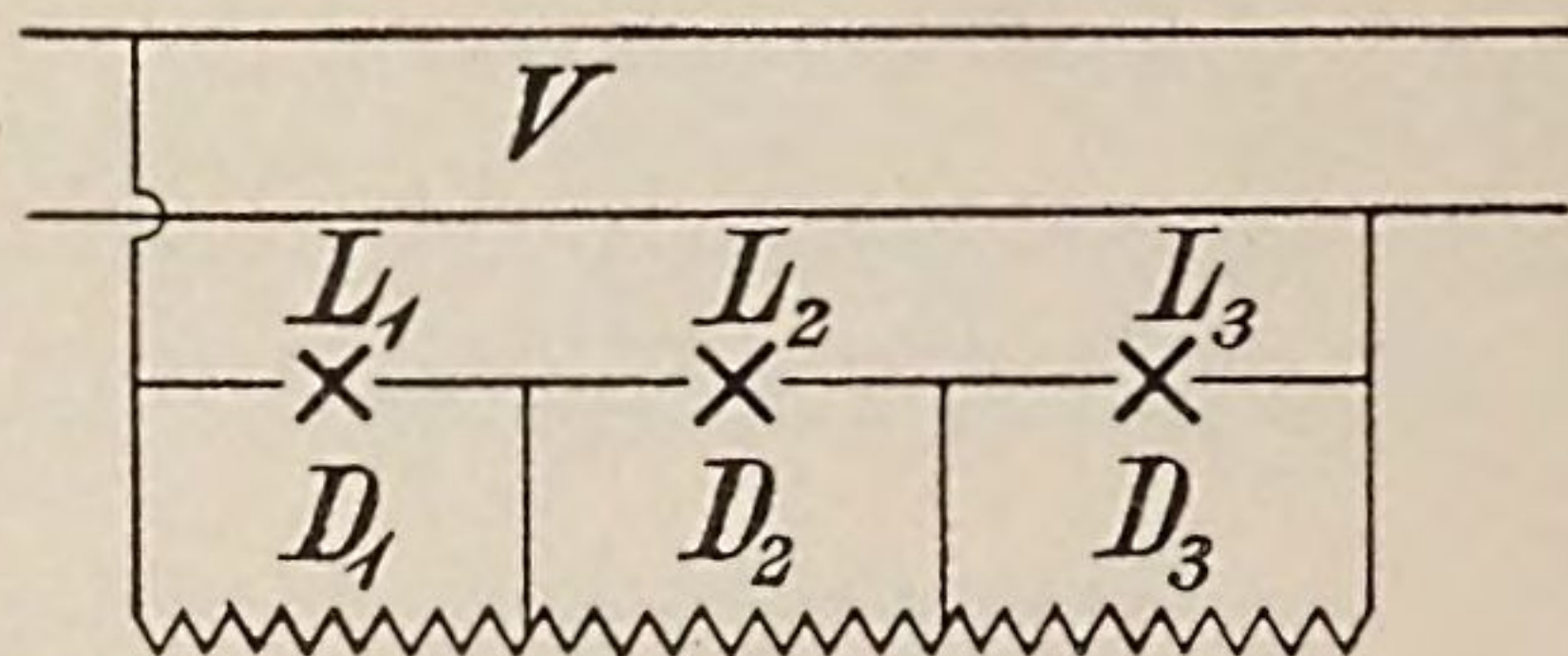


Fig. 96.

Der Transformator hat jetzt drei übereinander gewickelte Spulen mit gemeinsamem Eisenkern. Es sei der Lampenstrom wieder 12 Ampère, und es seien die Lampen L_2 und L_3 ausgeschaltet. Dann fließt durch D_2 und D_3 ein Strom von etwas über 4 Ampère und induziert in D_1 einen Strom von etwas unter 8 Ampère, der sich zum Primärstrom addiert, so daß die Lampe L_1 mit der normalen Stromstärke von 12 Ampère gespeist wird. Solche Transformatoren werden in Hausinstallationen zum Anschluß von Bogenlampen vielfach verwendet, weil man dadurch die Vorteile der Serienschaltung und Unabhängigkeit jeder Lampe von den anderen gleichzeitig erzielt. Auch ist die Leistung der Transformatoren kleiner als jene von Einzeltransformatoren für jede Lampe, wie man leicht aus folgender Überlegung sieht. Es sei e die Spannung in der Verteilungsleitung und P der Energiebedarf einer Lampe bei dem Normalstrom i . Dann ist für Fig. 95 bei $\cos \varphi = 1$

die Leistung des Transformators $e \times \frac{i}{2} = \frac{P}{2}$, während jene von

zwei Einzeltransformatoren sein würde $2 \times \frac{e}{2} \times i = P$. Mit andern

Worten: der gemeinsame Transformator für zwei Lampen in Serienschaltung enthält nicht mehr Material als ein gewöhnlicher Transformator für eine Lampe in Parallelschaltung. Bei der Anordnung Fig. 96 muß der Transformator für die Spannung e und die Strom-

stärke $\frac{2}{3} i$ konstruiert sein. Der Materialverbrauch entspricht also

einer Leistung von $\frac{2}{3}P$, während die Gesamtleistung von 3 Einzeltransformatoren $3 \times \frac{i}{3} \times e = P$ sein würde. Die Anwendung eines kombinierten Transformators ist also auch in diesem Falle vorteilhaft.

Dreileitersystem. Transformatoren mit kombinierter Sekundärwicklung lassen sich auch bei Stromverteilung mit Dreileitersystem vorteilhaft anwenden. Die Primärwicklung, welche den Hochspannungsstrom von der Speiseleitung s (Fig. 97) erhält,

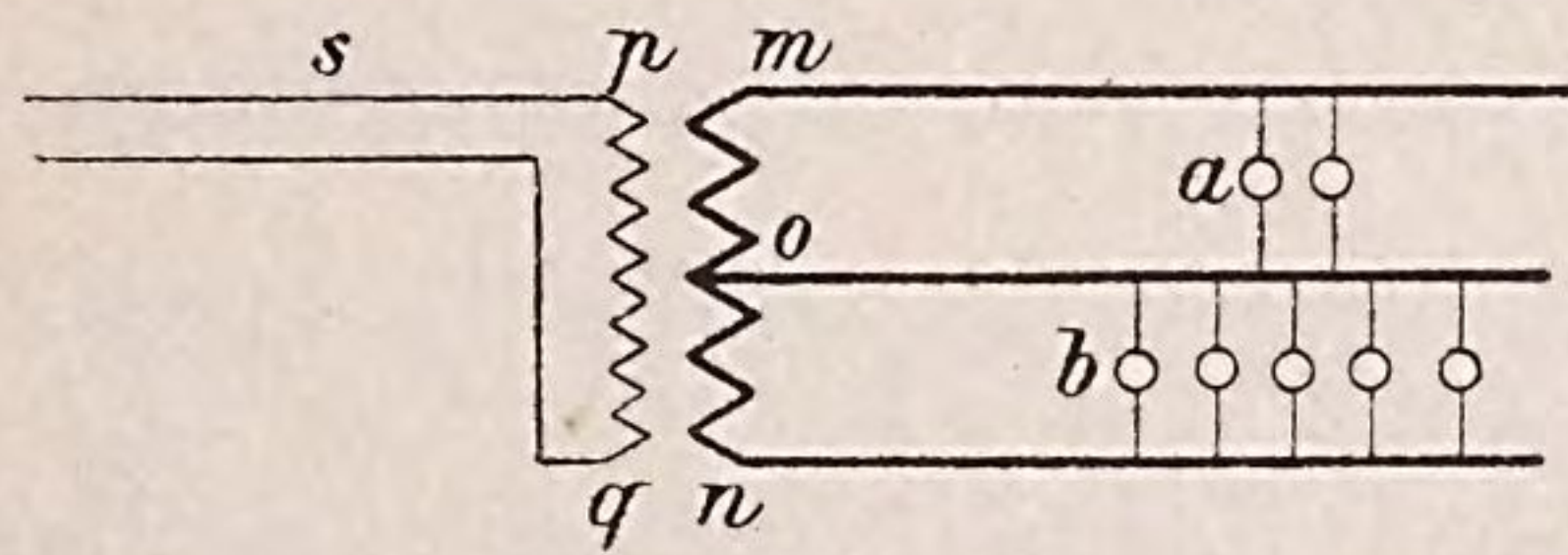


Fig. 97.

hat nur zwei Klemmen p, q . Die Sekundärwicklung hat drei Klemmen m, o, n , von denen o für beide Teile des Verteilungsnetzes gemeinsam ist. Die Spannung zwischen m und n ist doppelt so groß als jene in den Stromkreisen a und b , und die Verteilungsleitungen können genau wie beim Dreileitersystem für Gleichstrom entsprechend leichter gehalten werden.

Ausgleichstransformator. Liegt der Transformator in einiger Entfernung vom eigentlichen Beleuchtungsgebiet, so braucht

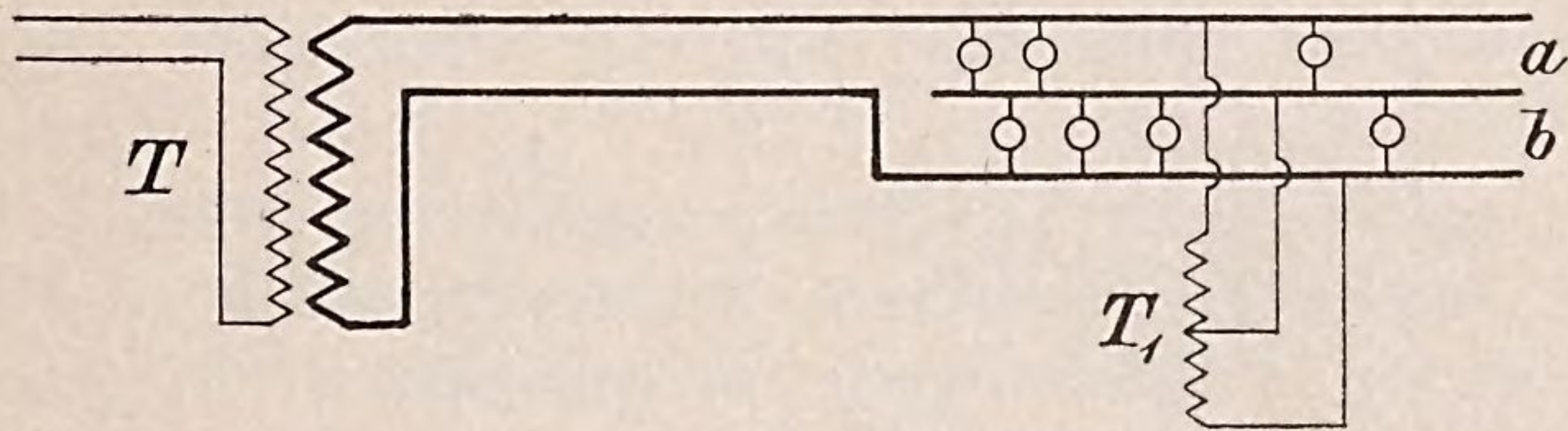


Fig. 98.

der Mittelleiter gar nicht zu ihm zurückgeführt zu werden, sondern man kann den Ausgleich zwischen den zwei Teilen des Dreileitersystems durch einen besonderen Ausgleichstransformator in ähnlicher Weise wie in Fig. 95 an Ort und Stelle bewirken. Die Anlage besteht dann aus dem Haupttransformator T auf der Unterstation (Fig. 98) und einem kleinen Ausgleichstransformator T_1 , welcher mitten im Beleuchtungsgebiet eingesetzt werden kann. Die Leistung

dieses Transformators braucht nicht größer bemessen zu werden, als der halben Differenz in der Belastung der beiden Stromkreise entspricht. Es sei i_a die maximale Strombelastung in a und i_b die gleichzeitig auftretende Belastung in b , so muß die eine Spule des Ausgleichstransformators den Strom $\frac{i_a - i_b}{2}$ aufnehmen und die andere den gleichen Strom abgeben. Ist e die Spannung in jedem Stromkreise, so ist die Leistung des Ausgleichstransformators $\frac{i_a - i_b}{2} e$. Die Leistung des Haupttransformators ist zur gleichen Zeit $\frac{(i_a + i_b)}{2} 2e$; da es aber doch vorkommen kann, daß zu gewissen Zeiten beide Stromkreise die maximale Belastung führen, muß dieser Transformator für eine Leistung von $2i_a e$ gebaut sein. Bezeichnet nun p das Verhältnis der Belastungsdifferenz zur Maximalbelastung eines Stromkreises, also $i_b = (1 - p) i_a$, so muß der Ausgleichstransformator für die Leistung $\frac{p}{2} i_a e$ gebaut sein, und seine Größe wird sich zu jener des Haupttransformators verhalten wie $2 : \frac{p}{2} = 4 : p$. Bei einer Belastungsdifferenz von 100, 50, 20 und 10% würde er also bezw. für $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{8}$, $\frac{1}{20}$ und $\frac{1}{40}$ der Leistung des Haupttransformators gebaut werden müssen. Man sieht, daß ein verhältnismäßig sehr kleiner Ausgleichstransformator die Zurückführung des Mittelleiters nach der Unterstation entbehrlich macht.

Scott's System der Stromverteilung. Eine andere Anwendung finden Transformatoren bei der Umwandlung eines Zweiphasen- in ein Dreiphasensystem und umgekehrt. Die Anordnung wie sie Fig. 99 zeigt, ist von Herrn C. F. Scott¹⁾ angegeben worden. G ist ein Zweiphasengenerator, dessen Stromkreise die Primärspulen von zwei gesonderten Transformatoren T_1 und T_2 enthalten. Die Sekundärspulen sind, wie die Figur zeigt, verbunden und haben drei Klemmschrauben A, B, C für die Außenleitung. Da die Primärströme in T_1 und T_2 gegeneinander um 90° verschoben sind, so sind die EM-Kräfte in den zwei Sekundärspulen

¹⁾ The Electrician, April 6. 1894.

auch um 90° gegeneinander verschoben. Die im äußeren Stromkreis AB wirkende EMK setzt sich also aus zwei Komponenten zusammen, nämlich jener, die in der Sekundärspule von T_1 erzeugt

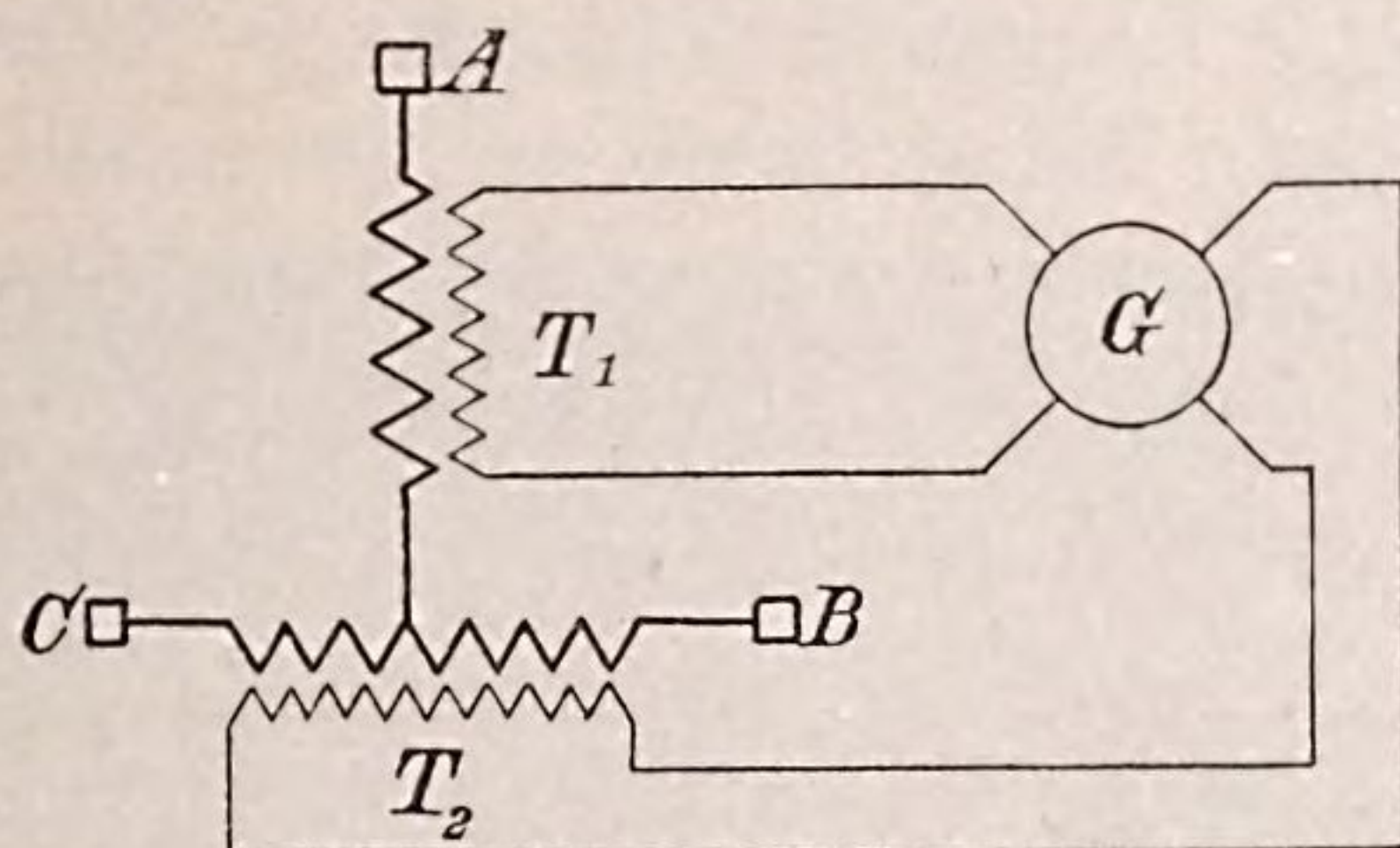


Fig. 99.

wird, und jener, die in der halben Sekundärspule von T_2 erzeugt wird. Seien OA und BO in Fig. 100 diese Komponenten, so ist BA die Resultante, d. h. die EMK zwischen B und A . Ebenso

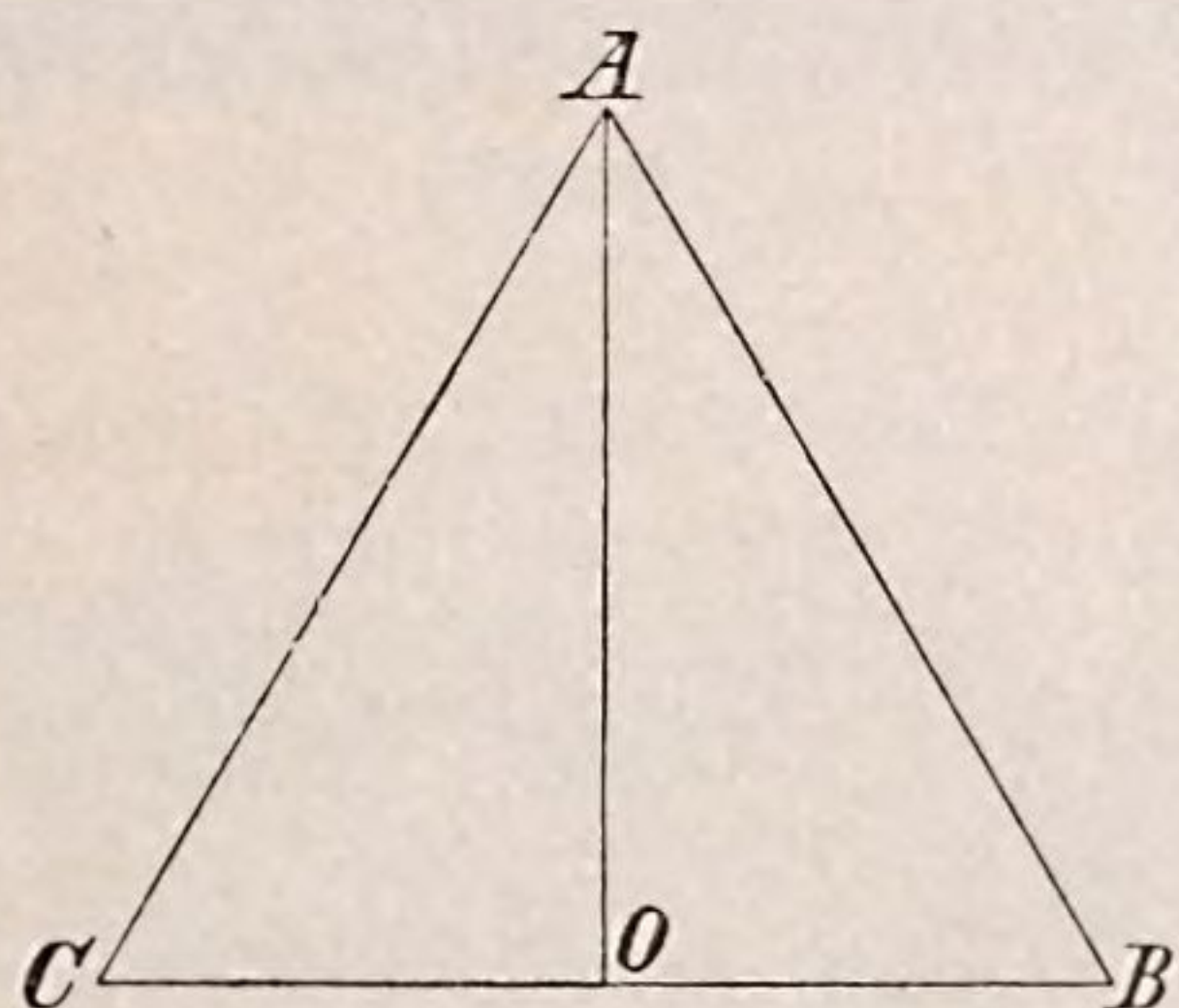


Fig. 100.

ist CA die EMK zwischen C und A . Die EMK zwischen B und C ist BC . Nun ist sofort klar, daß man es durch geeignete Wahl der sekundären Windungszahlen erreichen kann, daß diese Resultanten der Größe nach einander gleich werden. Man muß die sekundären Spulen so wickeln, daß $OB = \frac{1}{2} AB$. Dann ist aber

$$OA = AB \sqrt{\frac{3}{4}}, \quad OA = 0,867 AB, \text{ und Fig. 100 ist ein gleichseitiges}$$

Dreieck. Im rotierenden Vektordiagramm gehen also die drei EM-Kräfte durch Null in Intervallen von 60° , d. h. jede zweimal in einer vollen Periode. Ebenso folgen sich die Maxima beider Vorzeichen in Intervallen von 60° , und wenn wir nur positive oder nur negative Maxima betrachten, ist der Abstand 120° . Die drei

Stromkreise gehen also durch die gleiche Phase in Intervallen von 120° oder mit anderen Worten, es besteht zwischen ihnen eine Phasenverschiebung von 120° . Es ist somit durch die eigentümliche Anordnung der Transformatoren der zweiphasige Primärstrom in einen dreiphasigen Sekundärstrom verwandelt worden.

Der Vorteil, den Herr Scott für sein System beansprucht, ist, daß die Stromerzeugung und Stromverwendung bei zwei Phasen, die Übertragung jedoch mittels dreier Phasen geschehen kann;

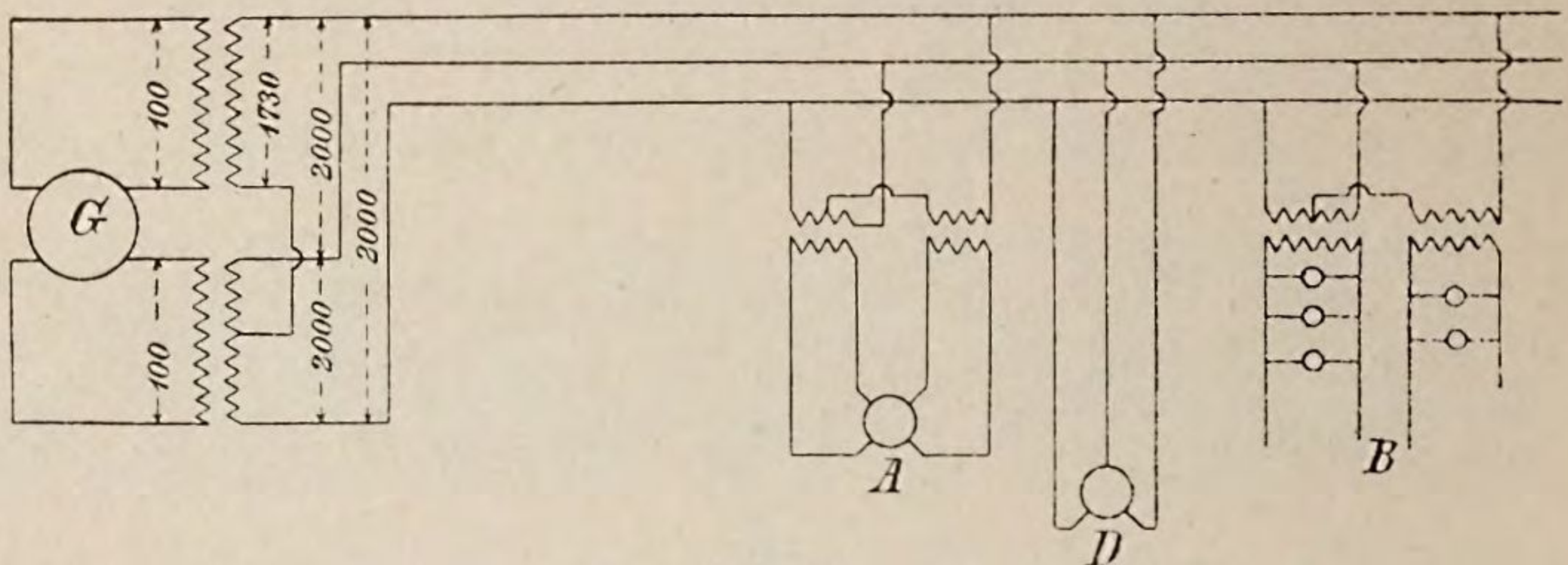


Fig. 101.

ersteres erleichtert die Regulierung bei gemischtem Betrieb von Motoren und Lampen, und letzteres führt eine Ersparnis in Leitungsmaterial herbei. Die von Scott angegebene Anwendung ist in Fig. 101 dargestellt.

G ist ein Zweiphasengenerator, dessen 100 V Spannung in den Transformatoren auf 2000 und 1730 V erhöht wird, so daß zwischen je zwei Drähten der dreifachen Speiseleitung 2000 V herrschen. An der Verbrauchsstelle wird wieder nach Bedarf auf 100 voltigen Zweiphasenstrom herabgesetzt für Motoren- oder Lampenbetrieb (A bzw. B), oder der dreiphasige Strom direkt zum Betrieb von Motoren verwendet, D . Trotz der Verkettung der Stromkreise macht die Regulierung auf konstante Lampenspannung nicht mehr Schwierigkeiten, als wären die Lampen unmittelbar an den Generator angeschlossen.

Neuntes Kapitel.

Beschreibung und Illustration der von einigen Firmen gebauten Transformatoren.

Um dem Leser einen allgemeinen Überblick in Bezug auf die konstruktive Ausbildung von Transformatoren zu geben, sind hier

Illustrationen von einer Anzahl Typen beigelegt, wie sie gegenwärtig von den verschiedenen Firmen gebaut werden.

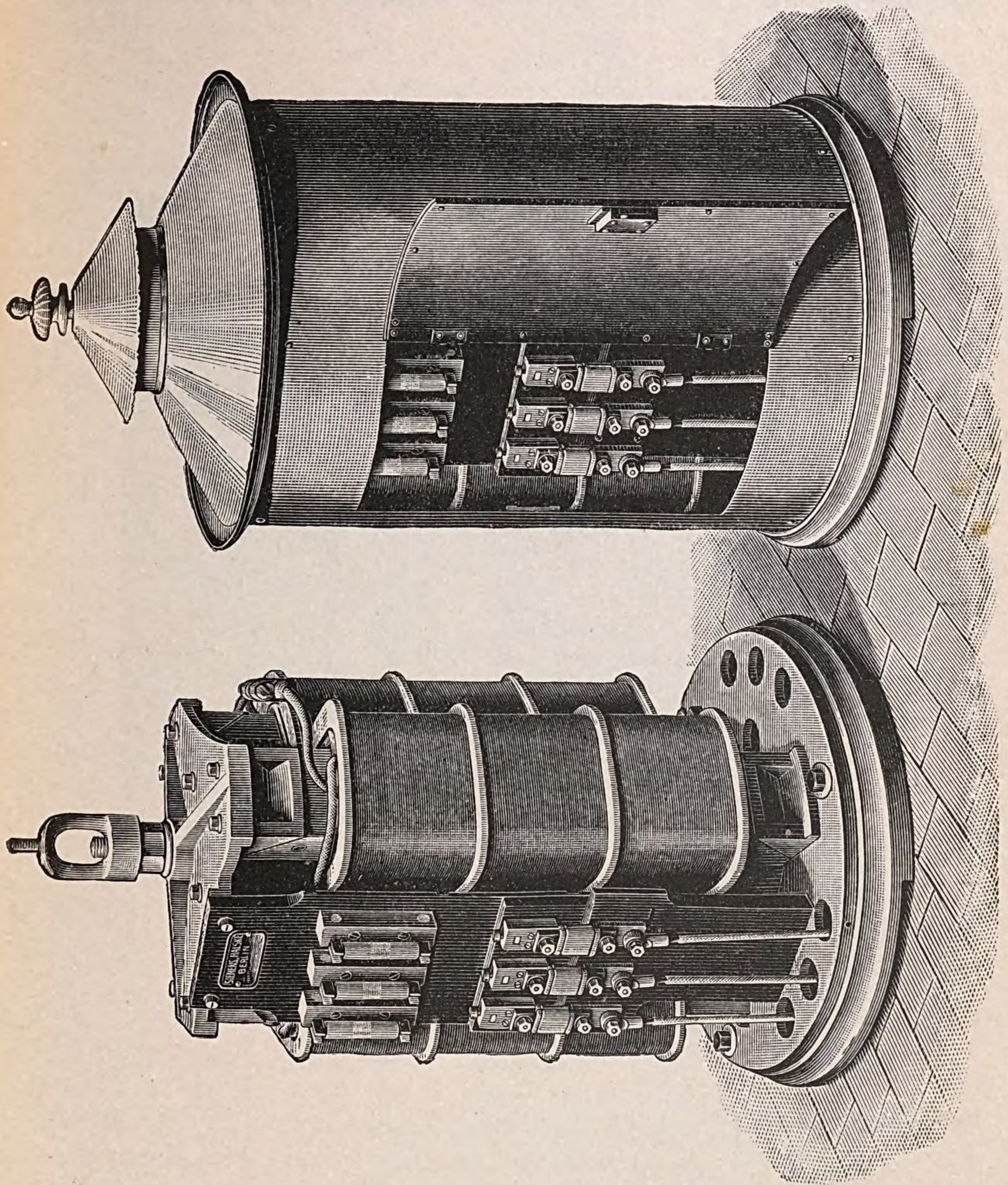


Fig. 102.

Siemens & Halske, Berlin, bauen Kerntransformatoren sowohl für Einphasen- als auch Mehrphasenstrom. Fig. 102 stellt einen Transformator für Dreiphasenstrom dar, mit und ohne Gehäuse. Die Kerne sind wie in Fig. 16 angeordnet und durch Guß-

platten mit schrägen Ansätzen gegen die Jochscheiben gedrückt. Die Klemmschrauben und Abschmelzsicherungen sind auf Tafeln montiert, die auch an den Endplatten befestigt sind. Die Zuführung

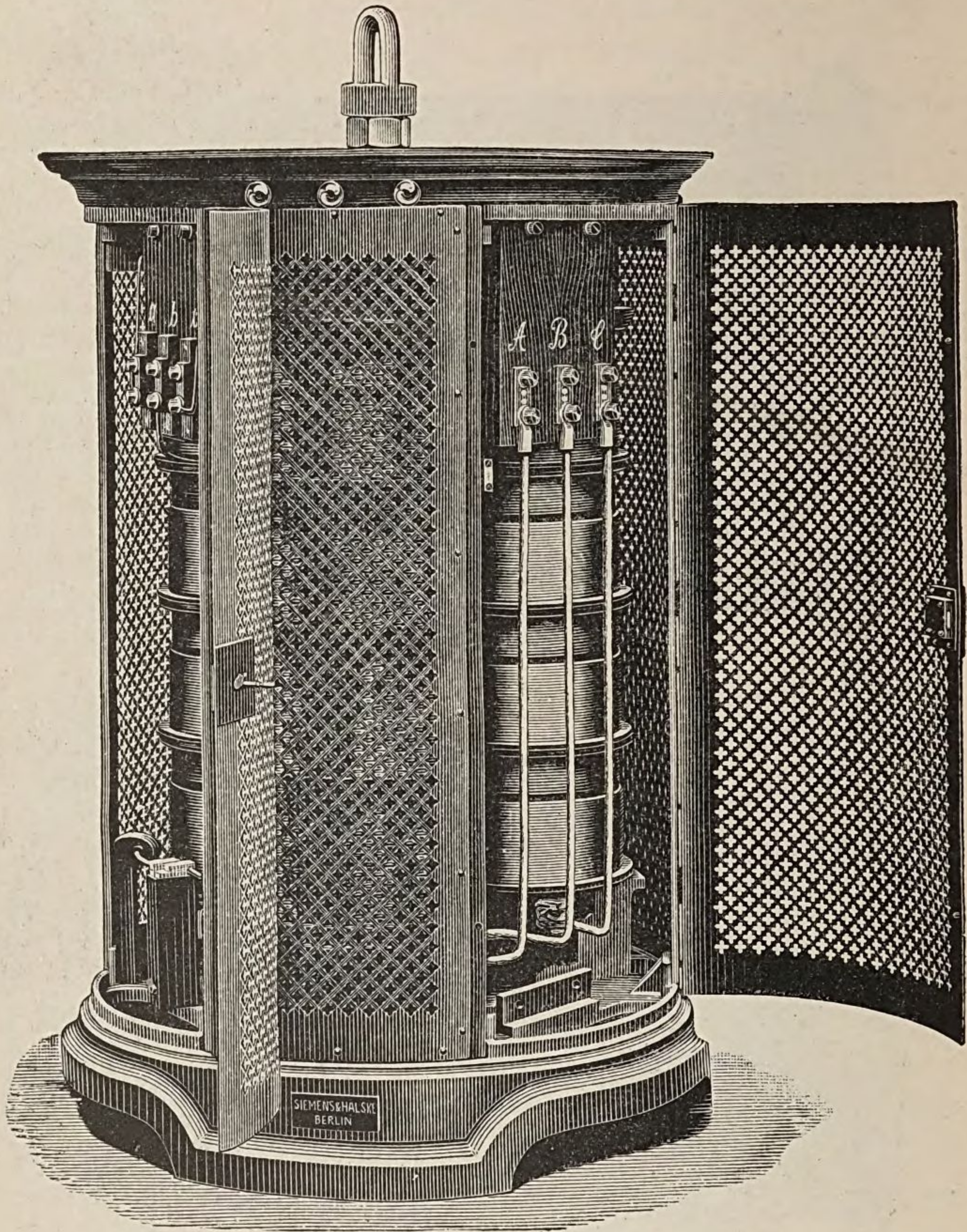


Fig. 103.

der Leitungen geschieht durch entsprechende Löcher in der Grundplatte. Fig. 103 zeigt einen Drehstromtransformator in einem Gehäuse aus perforiertem Blech, welches der Luft überall Zutritt gestattet, aber natürlich nur zur Aufstellung in trockenen Räumen geeignet ist. Zur Aufstellung im Freien muß die Konstruktion Fig. 102 mit vollkommen dicht abgeschlossenem Gehäuse benützt werden. Für einphasigen Wechselstrom werden die Transformatoren

ähnlich gebaut, nur dafs zwei anstatt drei Kerne zur Anwendung kommen. Die Fig. 104 und 105 in Verbindung mit den Tabellen geben die äufseren Dimensionen der Apparate für verschiedene Leistungen an.

Tabelle für Dimensionen der Drehstromtransformatoren.

Die eingeschriebenen Mafse sind Millimeter.

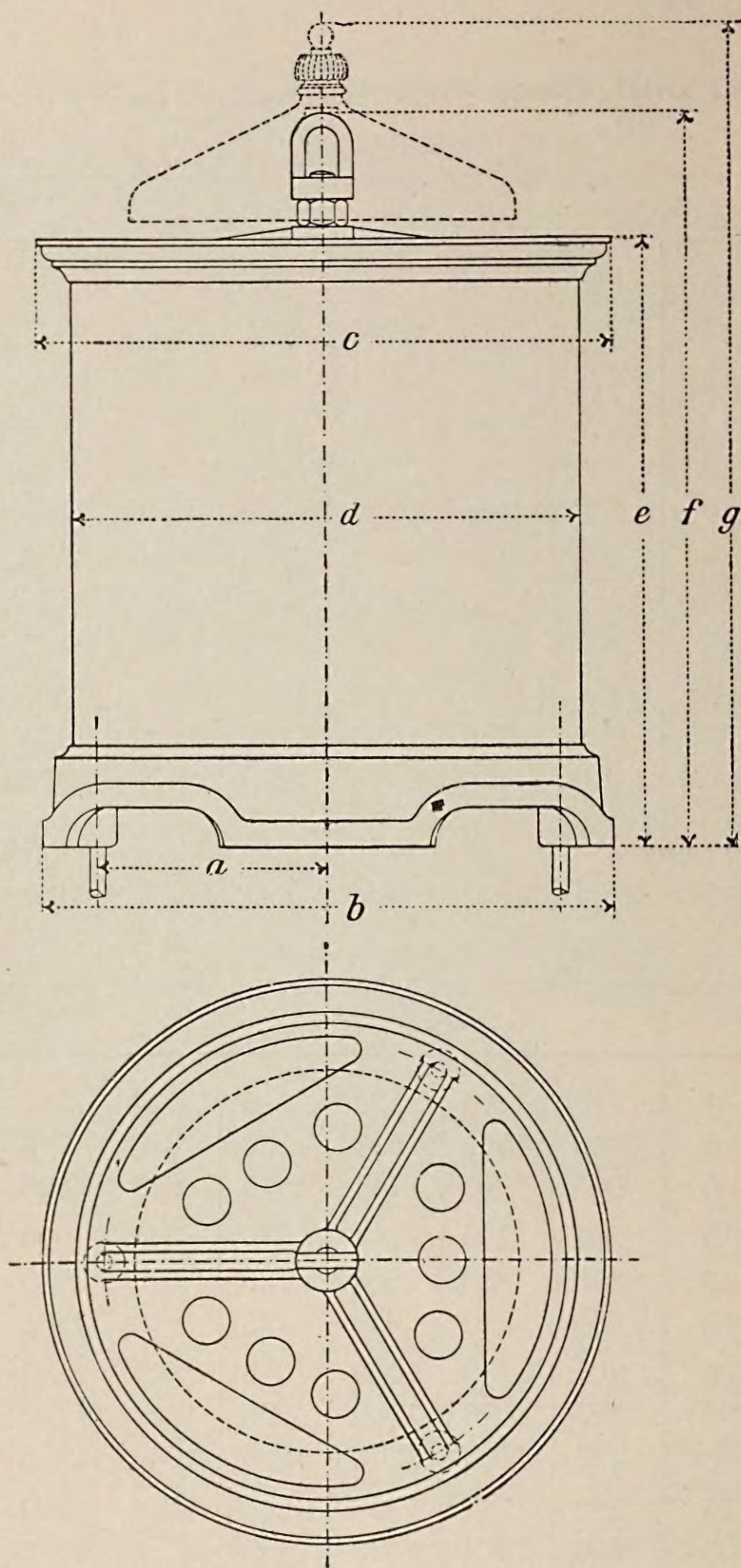
Kwt.	a	b	c	d	e	f	g
2,5	235	595	595	530	630	760	850
5	300	720	720	655	690	855	940
7,5	300	720	720	655	690	855	940
10	305	730	740	675	850	1020	1110
15	350	820	830	765	870	1065	1150
20	350	820	830	765	1070	1265	1350
30	405	980	1020	885	1250	1515	1660
50	425	1020	1060	925	1500	1730	1900
75	490	1160	1200	1065	1540	1855	2025
100	490	1160	1200	1065	1540	1855	2025
150	550	1300	1320	1185	1840	2155	2285
200	610	1400	1440	1305	2150	2455	2625

Tabelle für die Dimensionen der Wechselstromtransformatoren.

Die eingeschriebenen Mafse sind Millimeter.

Kwt.	a	b	c	d	e	f	g
1	210	510	530	475	470	590	675
2,5	240	590	590	530	610	745	830
5	295	720	710	665	660	825	910
7,5	300	730	740	675	820	990	1075
10	350	820	830	765	870	1065	1160
15	350	820	830	765	1070	1265	1360
20	405	980	1020	885	1245	1500	1635
30	425	1020	1060	925	1500	1750	1880
50	480	1160	1200	1065	1540	1830	1960
75	480	1160	1200	1065	1540	1830	1960
100	540	1300	1320	1185	2070	2145	2280
150	610	1400	1440	1305	2140	2455	2285

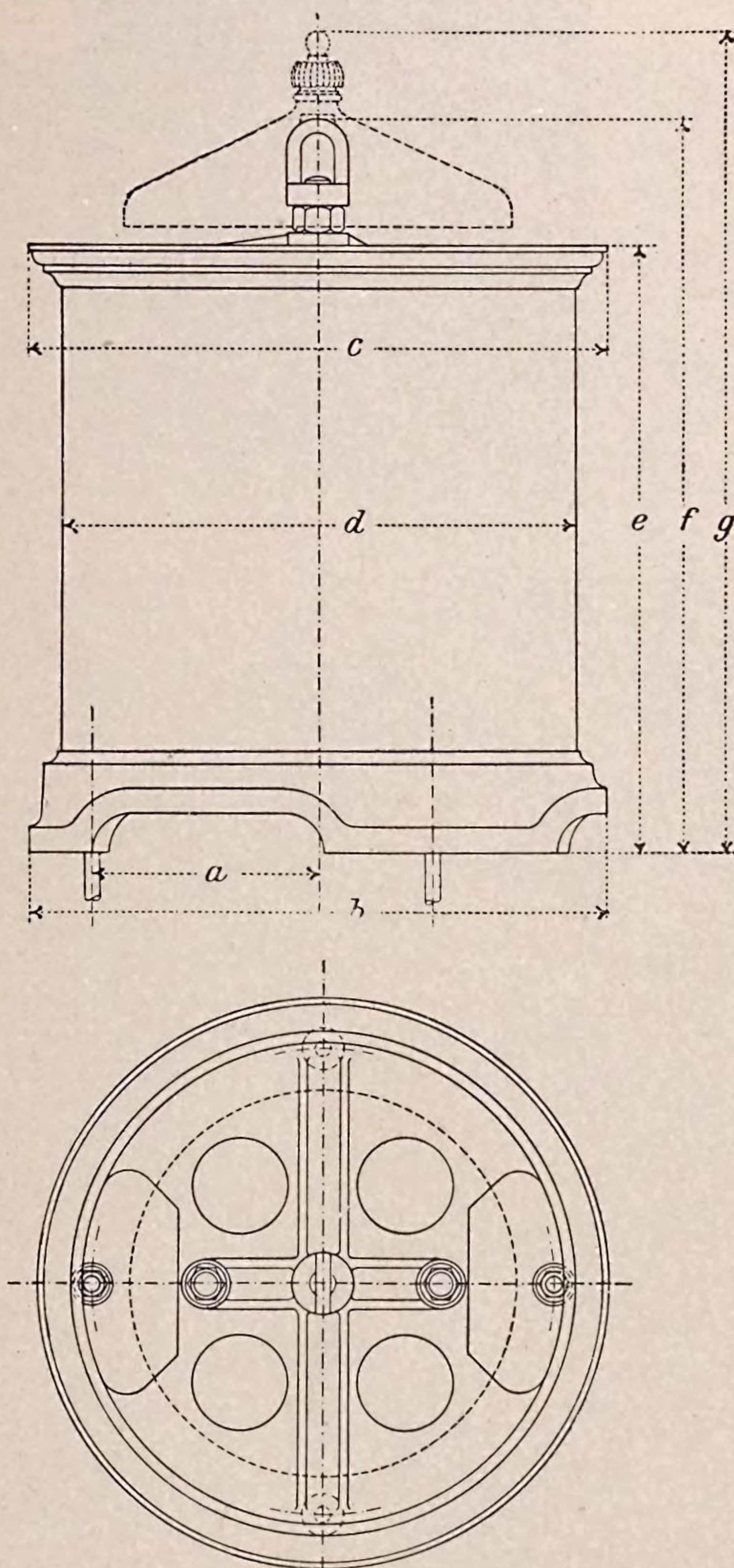
Die Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vormals Schuckert & Co. in Nürnberg baut einphasige Transformatoren nach der Manteltype und Drehstromtransformatoren nach



Drehstrom.

Fig. 104.

der Kerntype. Die ersteren sind durch Fig. 106 (2 Kwt) und Fig. 107 (40 Kwt) veranschaulicht; die letzteren durch Fig. 108. (10 Kwt). Bei den Apparaten für Einphasenstrom sind die Spulen



Wechselstrom.

Fig. 105.

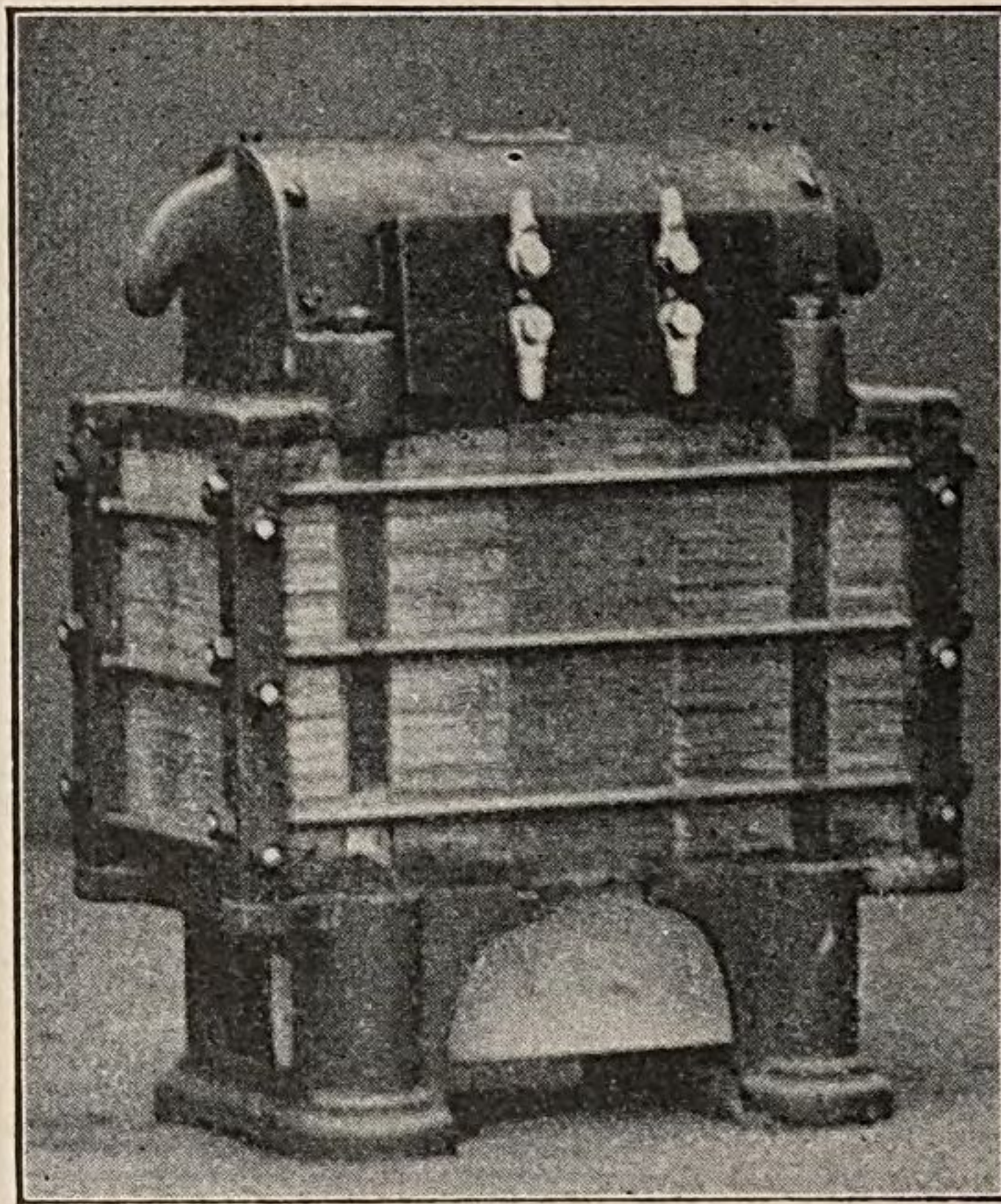


Fig. 106.

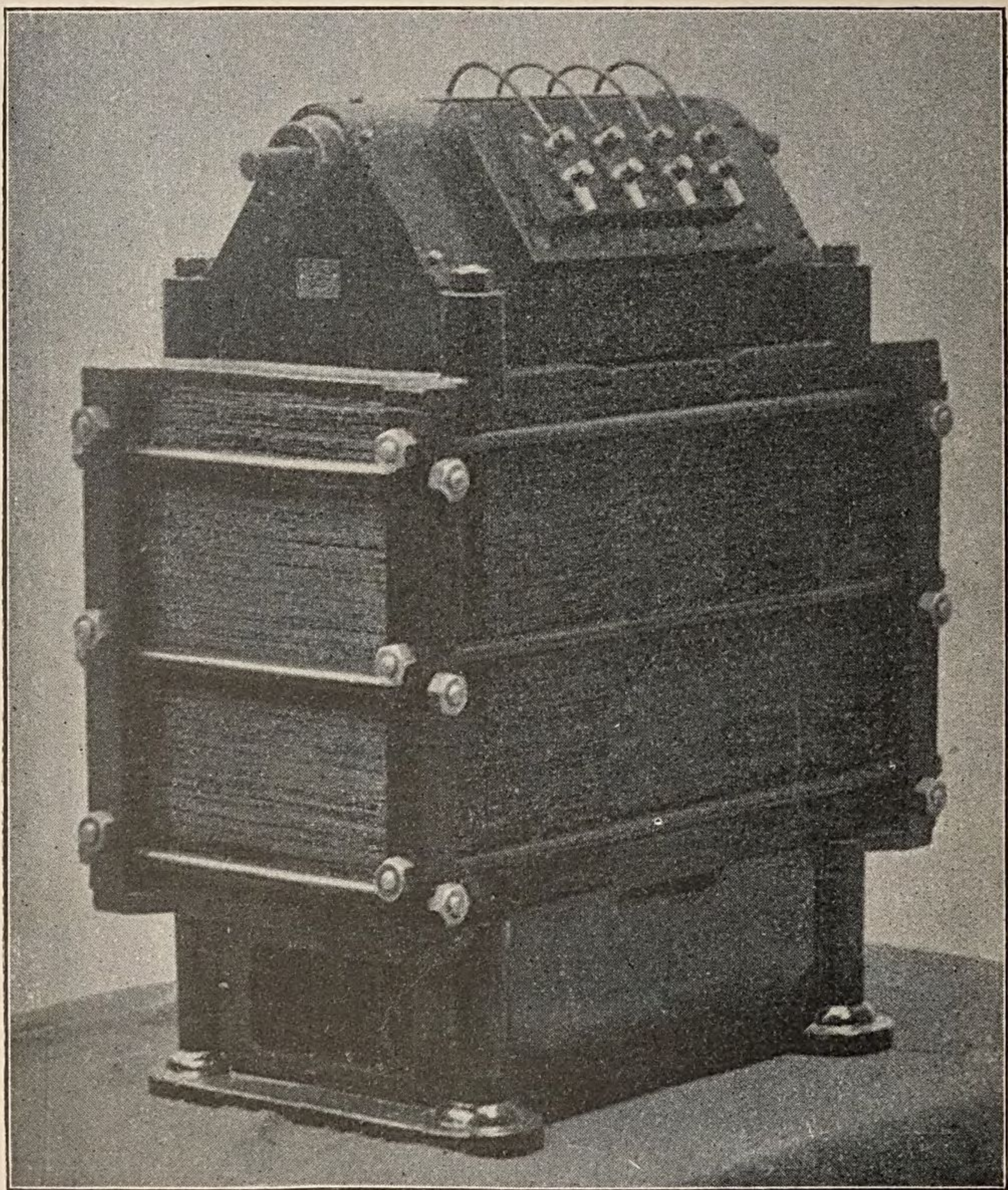


Fig. 107.

vollständig in Eisen eingebettet und auch oben und unten durch besondere Gehäuse geschützt. Die Verbindung der Gehäuse geschieht durch starke Schraubenbolzen, welche gleichzeitig die

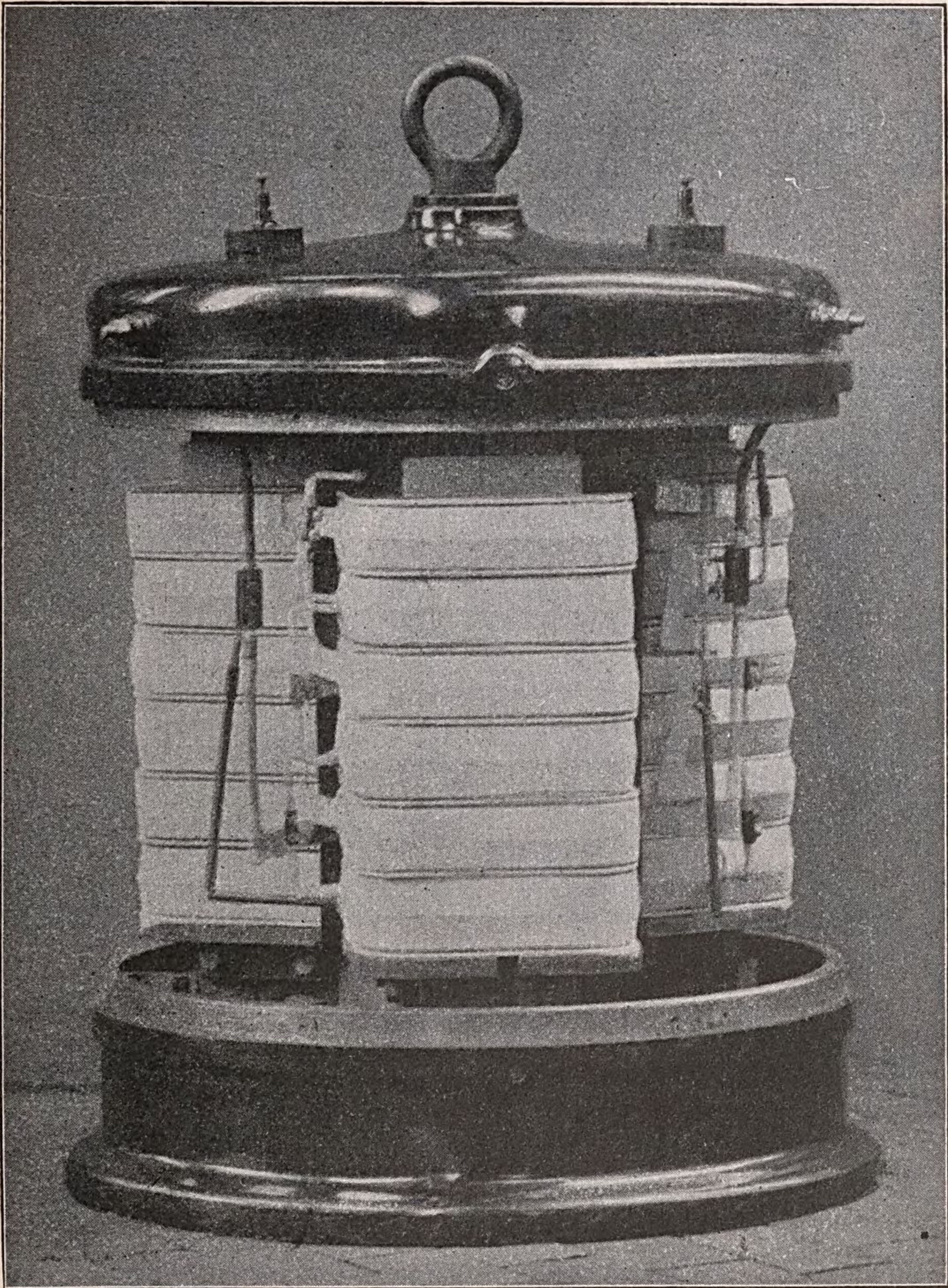


Fig. 108.

Bleche gegeneinander pressen. Seitlich sind die Bleche durch Eckschienen und Schraubenbolzen ebenfalls gesichert. Bei dem Transformator für Drehstrom ist die Wicklung auf jedem Kerne

behufs Verminderung der Streuung in eine Anzahl flacher Spulen unterteilt. Die Spulen sind durch einen cylindrischen äusseren Mantel geschützt, welcher jedoch in der Illustration fehlt. Die Einführung der Leitungen geschieht durch Stopfbüchsen im oberen Deckel.

Die Berliner Maschinenbau-Aktien-Gesellschaft vormals L. Schwartzkopff baut für Einphasenstrom Transformatoren der Manteltype mit langem Kern (vgl. Fig. 12d), macht

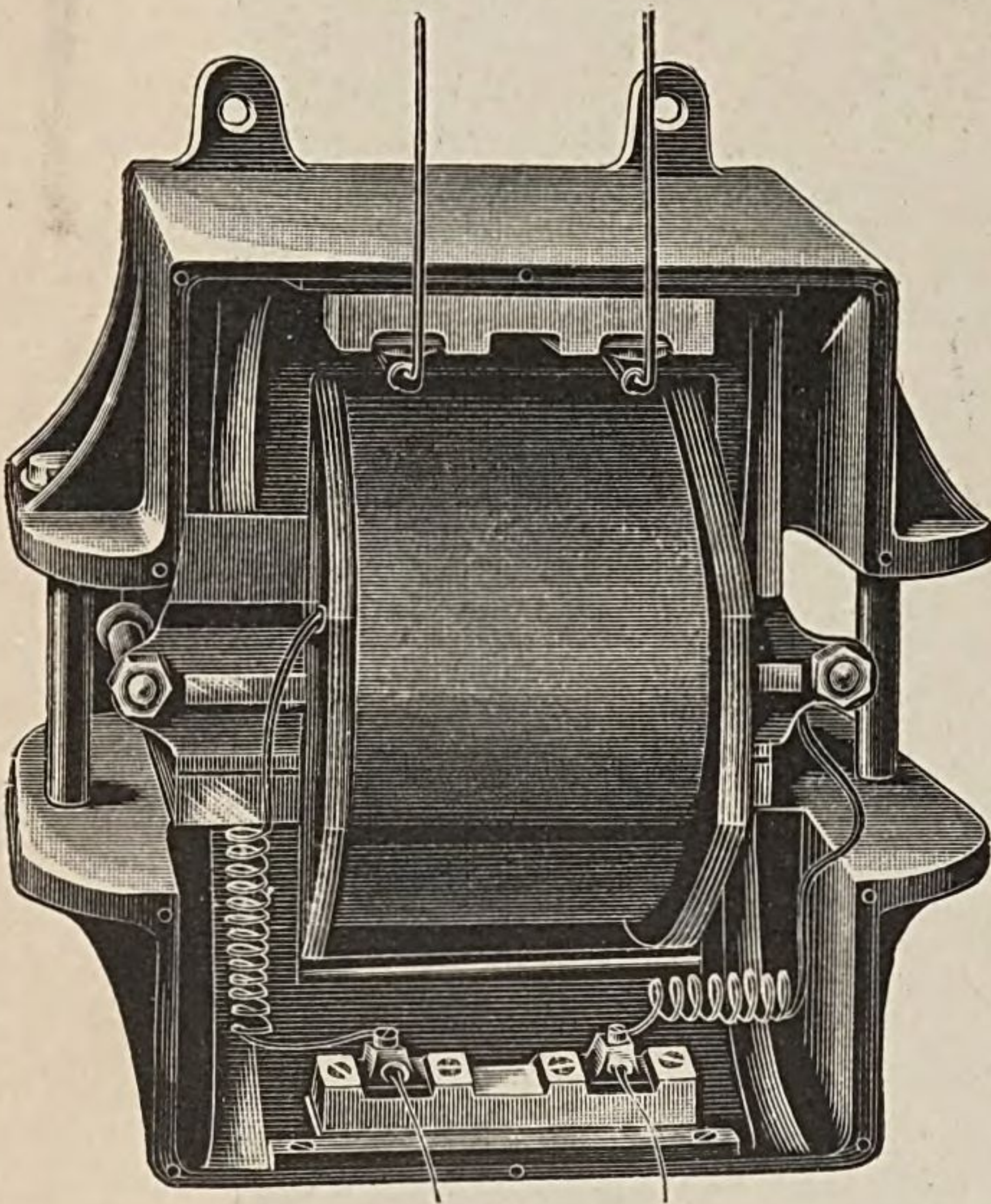


Fig. 109.

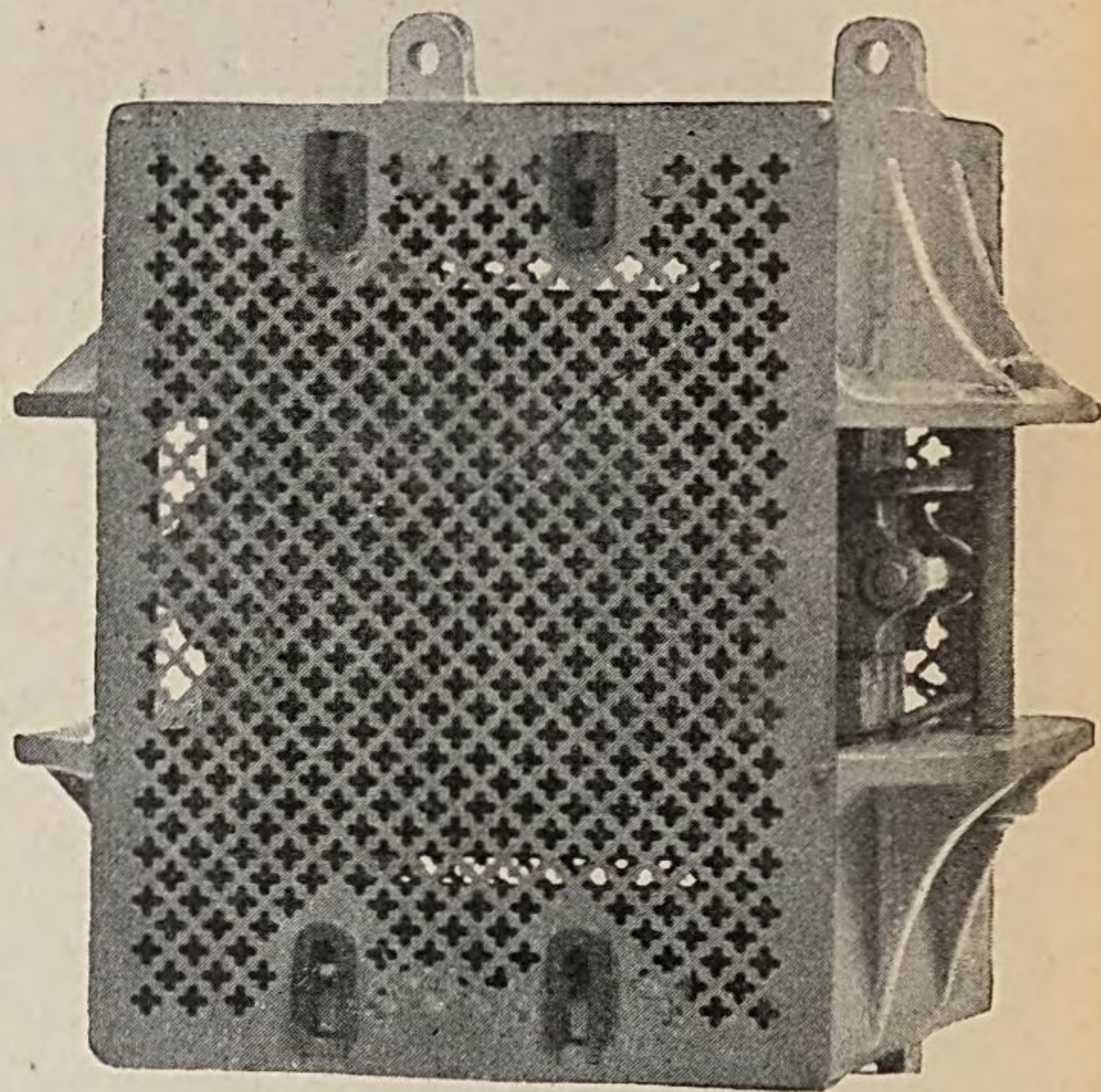


Fig. 110.

aber den Querschnitt des Mantels erheblich gröfser, als jenen des Kernes, um den Hysteresisverlust zu vermindern. Der Eisenkörper wird, wie Fig. 109 zeigt, durch zwei kräftige, gusseiserne Rahmen mittels Schraubenbolzen zusammengehalten. Die in der Mitte angeordneten Spulen werden durch perforierte Bleche (Fig. 110) vor Beschädigung geschützt.

Siemens Brothers & Co. Ld. in London bauen ebenfalls die Manteltype mit langem Kern, vermeiden aber Stofsfugen, indem sie die ausgestanzten Bleche einzeln und in der Weise einführen, dafs die Fuge einer Lage durch das volle Blech der nächsten Lage abgedeckt wird. Der Eisenkörper wird, wie Fig. 111

zeigt, durch gußeiserne Rahmen und Schraubenbolzen zusammengehalten. Die Spulen werden auf einen Cylinder von besonderem Isoliermaterial gewickelt, welches durch Erhitzung nicht leidet, und mit Flanschen aus Holz versehen. Die einzelnen Lagen der Hochspannungswickelung sind ebenfalls durch dünne Schichten desselben

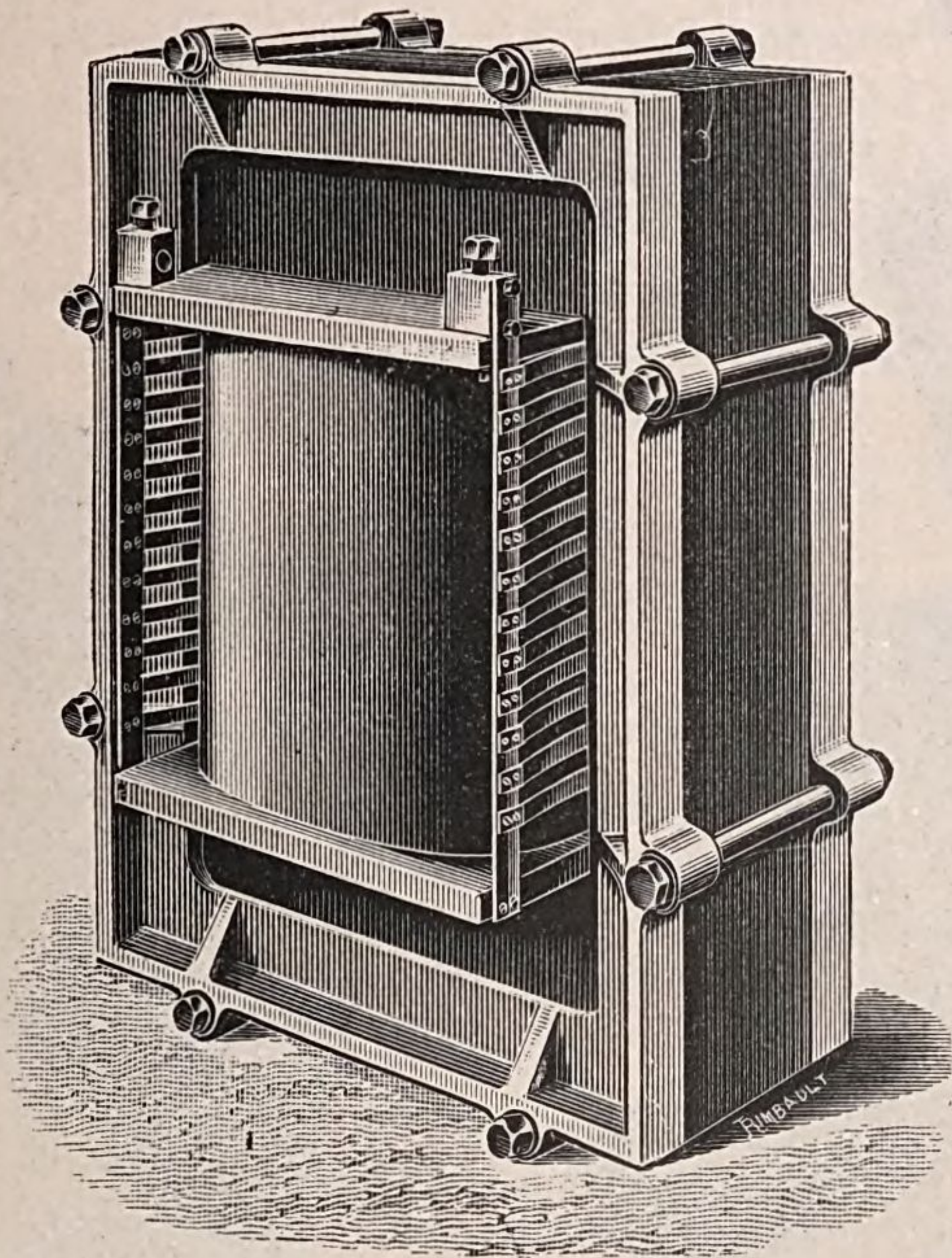


Fig. 111.

Isoliermaterials von einander getrennt. Die Niederspannungswickelung besteht in dem vorliegenden Transformator aus einer Anzahl parallel gewickelter Drähte, die durch zwei Sammelschienen mit den Klemmen verbunden sind. Diese Klemmen sind unmittelbar auf der oberen Holzflansche befestigt, während jene für die Hochspannungswickelung ebenfalls auf dieser Flansche, aber auf der gegenüberliegenden Seite und zwar mittels besonderer Isolierstücke von Hartgummi angebracht sind.

Brown, Boveri & Co. in Baden (Schweiz) bauen für Einphasenstrom Transformatoren, welche, streng genommen, weder der Kern- noch der Manteltype angehören, sondern gewissermaßen

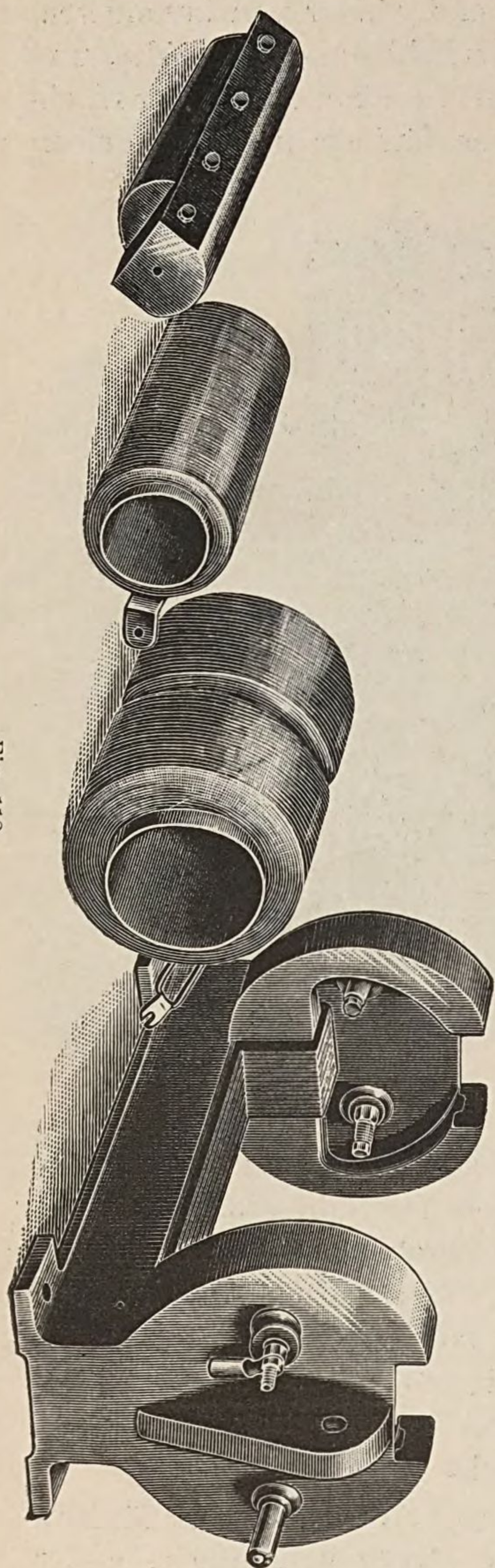


Fig. 112.

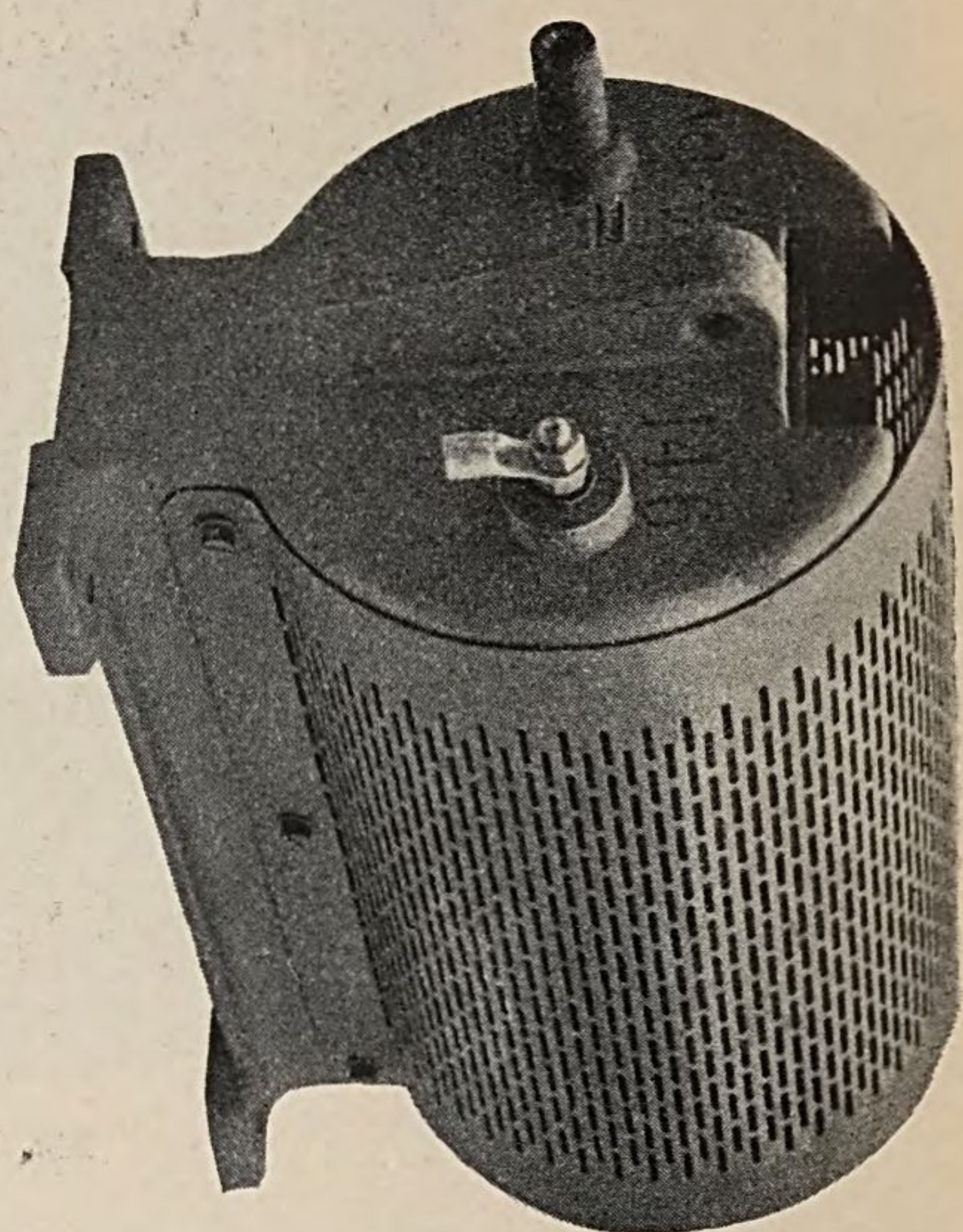
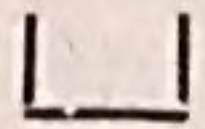


Fig. 113.

eine Mittelstellung einnehmen. Die Spulen sitzen auf einem Kern, der nur einseitig durch ein Joch von solcher Form  zu einem magnetischen Kreise geschlossen ist. Fig. 112 zeigt die Einzelheiten dieser Konstruktion. Die Jochbleche werden in den unteren Verbindungssteg zwischen den Endstücken des Gehäuses dicht eingetrieben, und der Kern wird, nachdem die Spulen aufgeschoben sind, darüber gelegt und durch Schraubenbolzen angeprefst. Die Spulen werden einzeln hergestellt, so daß eine in die andere geschoben werden kann. Die Verbindung mit der Leitung geschieht durch Schrauben und Stifte, welche letztere durch isolierte Ausbohrungen in den Endstücken des Gehäuses durchgehen. Der Kern ist nahezu cylindrisch und an den Enden etwas eingeschnitten, um die Berührungsfläche mit den Jochblechen zu vergrößern. Die Spulen werden, wie Fig. 113 zeigt, durch eine Umhüllung von perforiertem Blech gegen mechanische Beschädigung von außen her geschützt. Für Mehrphasenanlagen verwendet die Firma eine Gruppe entsprechend geschalteter Einphasen-Transformatoren.

Die Elektrizitäts-Aktien-Gesellschaft vormals W. Lahmeyer & Co. in Frankfurt a/M. baut sowohl für Ein-, als auch Mehrphasenstrom Kerntransformatoren. Die Konstruktion ist in Fig. 114 und 115 veranschaulicht. Der illustrierte Einphasen-Transformator ist bestimmt für eine Leistung von 30 Kwt, und der Drehstrom-Transformator für eine solche von 40 Kwt, wobei in beiden Fällen das Umsetzungsverhältnis 5000 zu 110 Volt ist. Infolge der hohen Primärspannung sind die Primärspulen in viele Abteilungen unterteilt, und ist dadurch die größtmögliche Sicherheit gegen Durchschlagen der Hochspannungswickelung erzielt worden. Um etwas an Draht zu sparen, sind die Kerne quadratisch und mit abgeschrägten Kanten versehen. Die Spulen sind unabhängig von einander gewickelt und ineinander geschoben. Die übrigen Einzelheiten der Konstruktion sind aus den Zeichnungen leicht zu entnehmen.

Die Brush Electrical Engineering Co. Ltd. in London baut die von William Mordey konstruierten Transformatoren, welche der Manteltype angehören. Die Art der Zusammenstellung des Eisenkörpers ist schon im dritten Kapitel beschrieben worden. Nachdem die Bleche eingebaut sind, werden sie durch kräftige gufseiserne Rahmen und Schraubenbolzen, wie Fig. 116 zeigt, zusammengefaßt und in einen Kasten, Fig. 117, eingesetzt. Der

obere Rahmen enthält einen Aufbau zur Befestigung einer starken Porzellanplatte, auf welcher Klemmschrauben, Sicherungen und ein

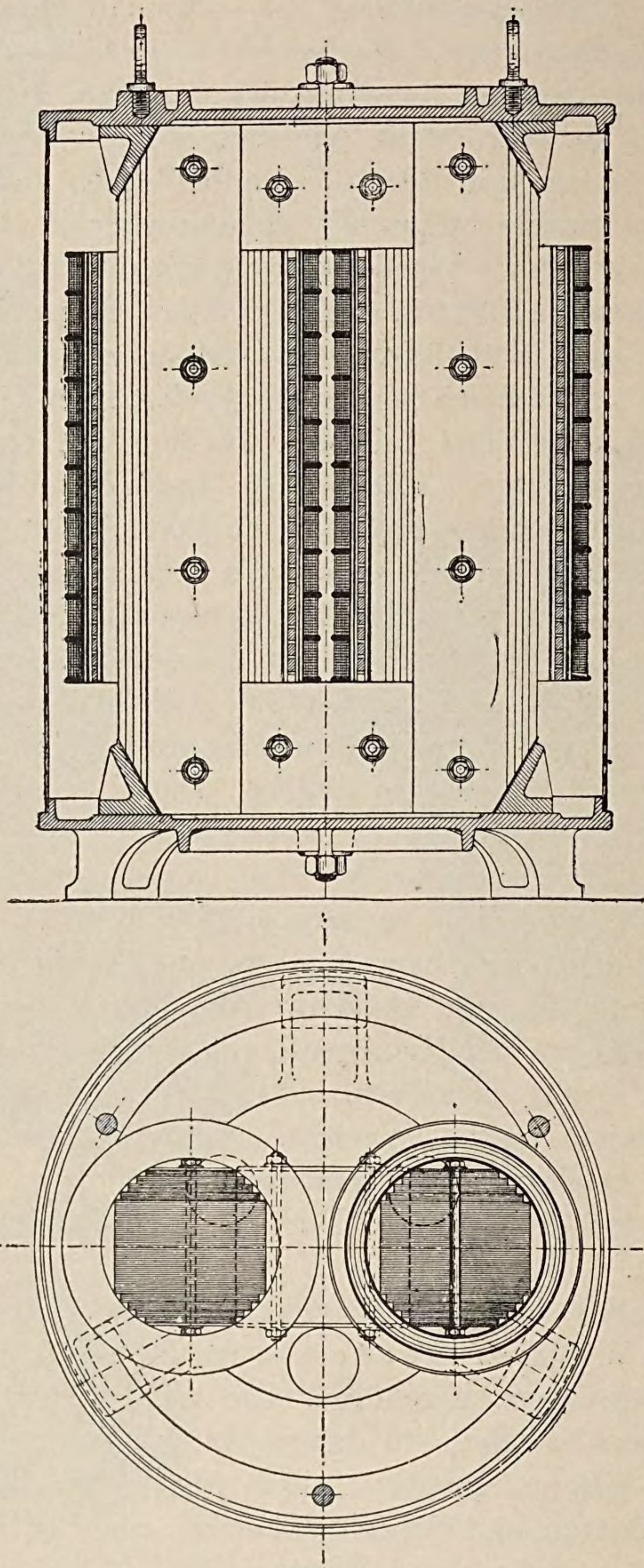


Fig 114.

Hochspannungsschalter befestigt sind. Der Griff für den Schalter ragt durch die Wand des Kastens knapp unter dem Deckel heraus

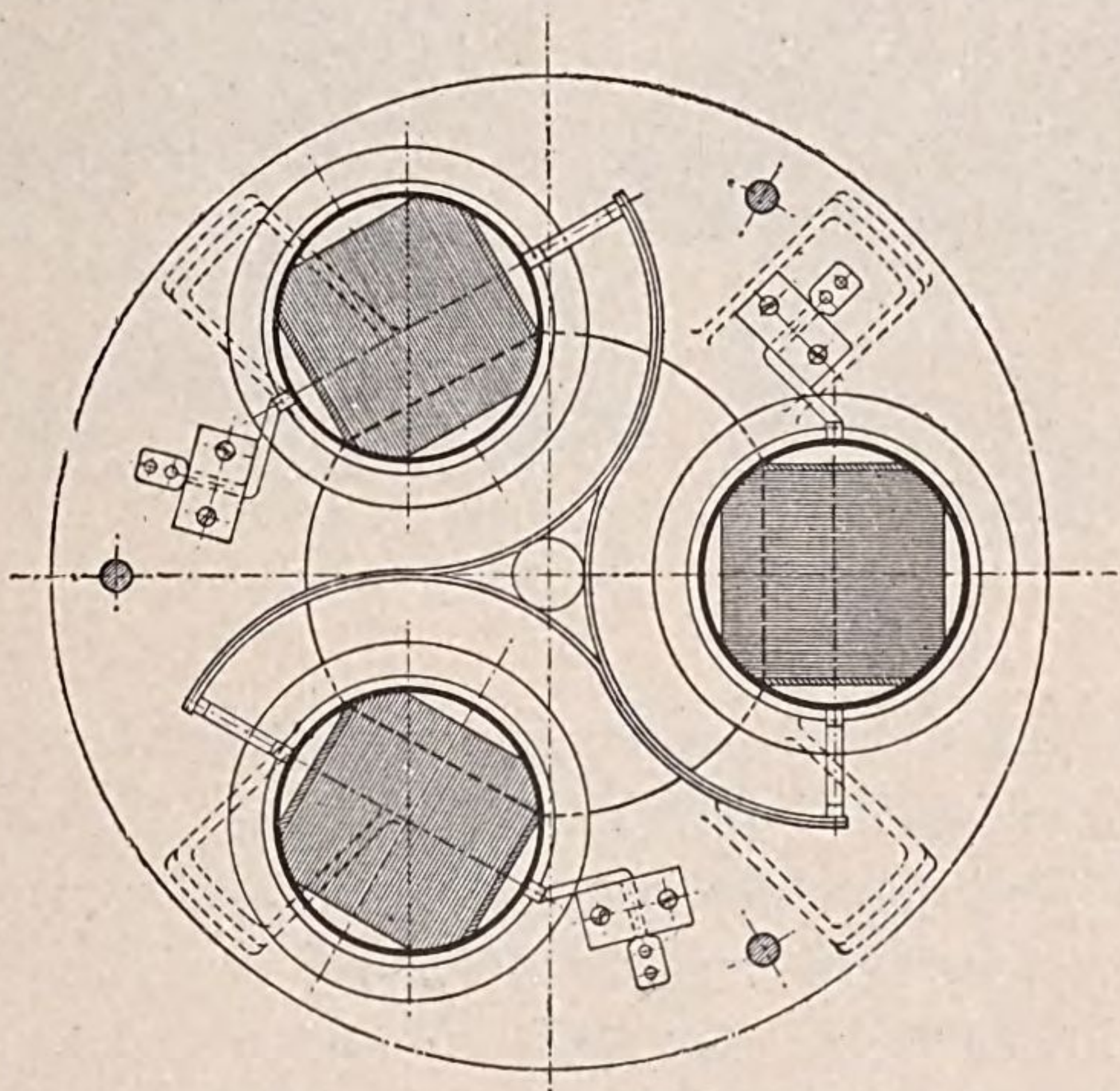
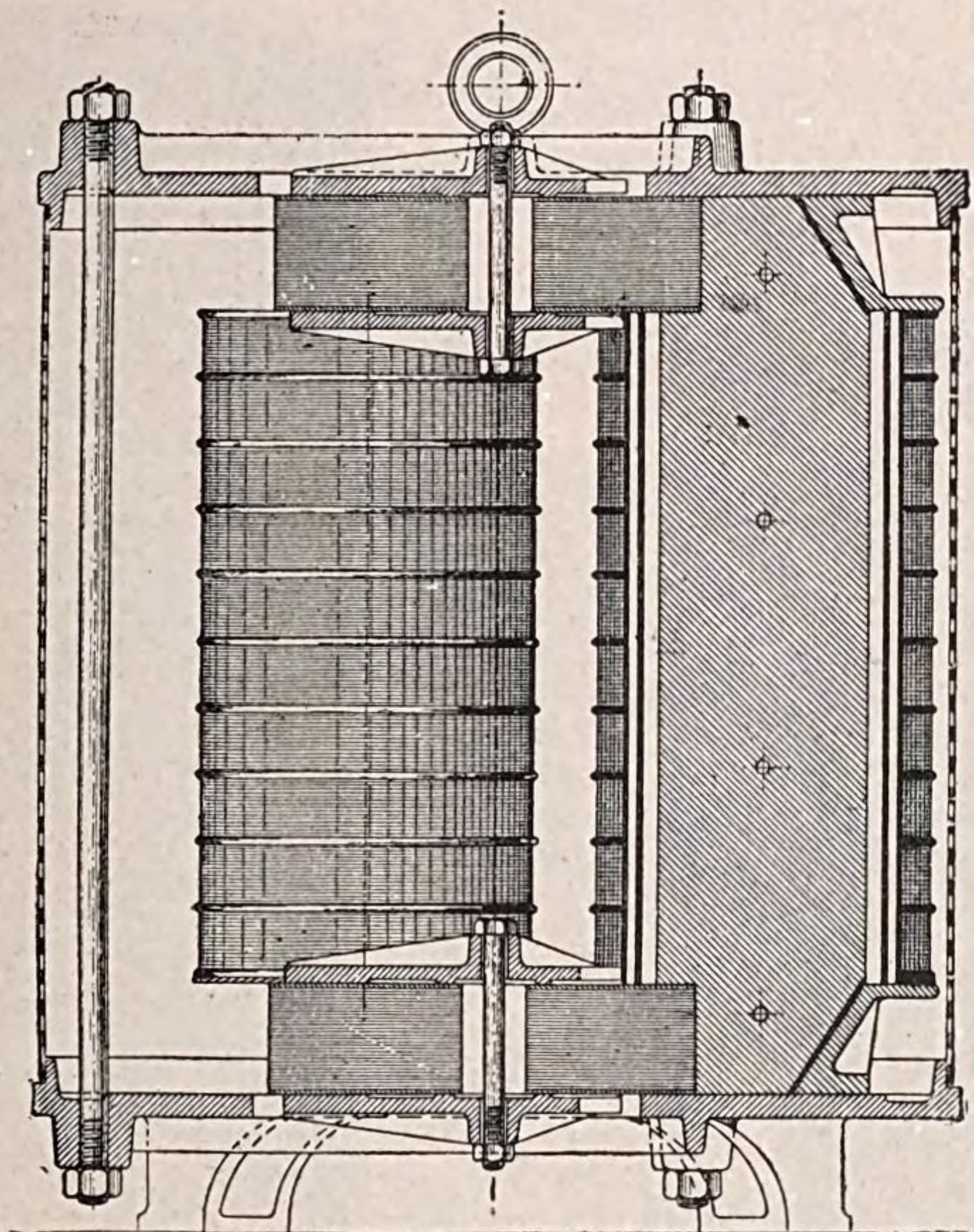


Fig. 115.

(Fig. 117), so daß der Transformator von der Hochspannungsleitung abgetrennt werden kann, ohne daß man deshalb den Deckel abzunehmen braucht.

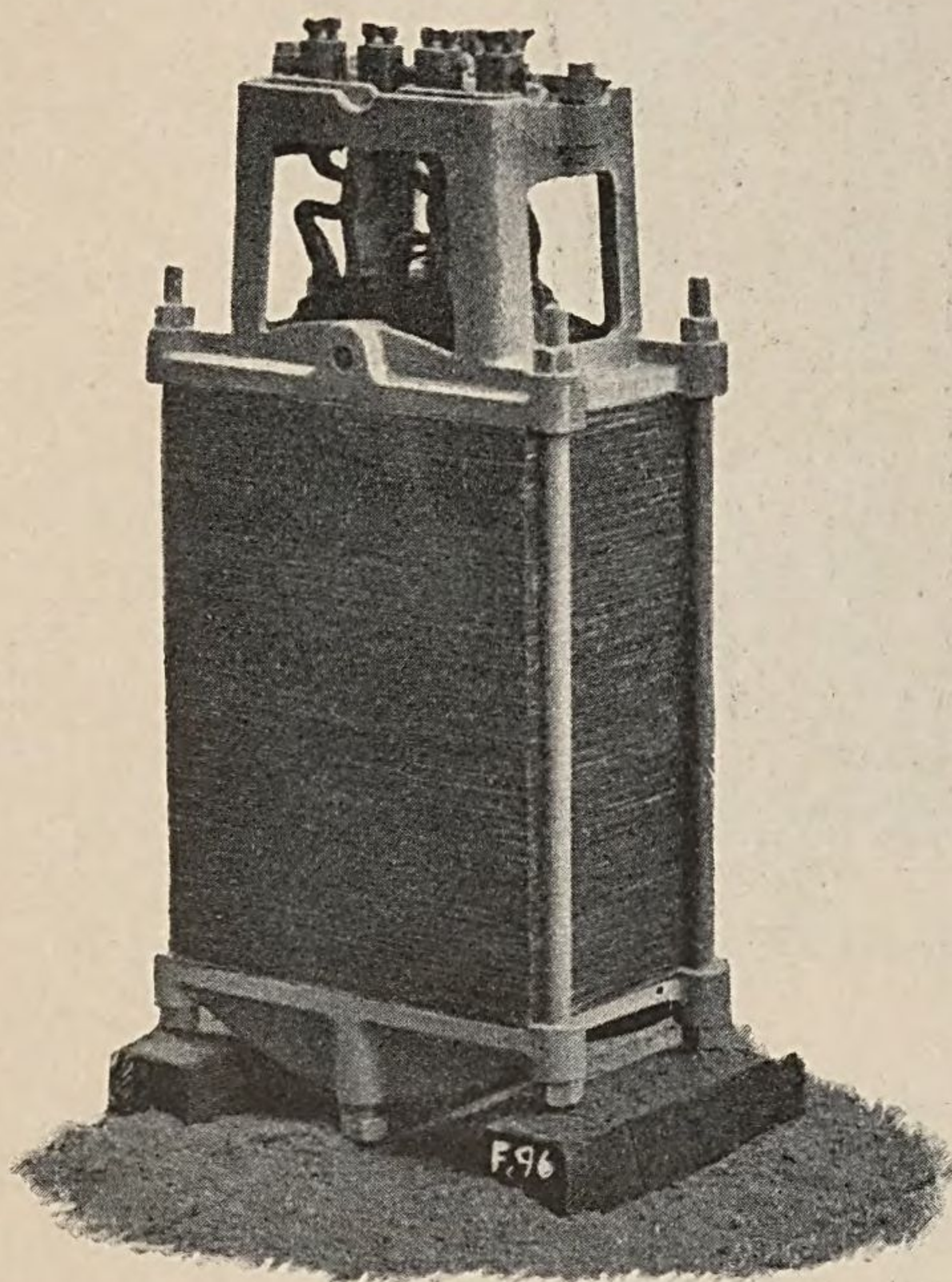


Fig. 116.

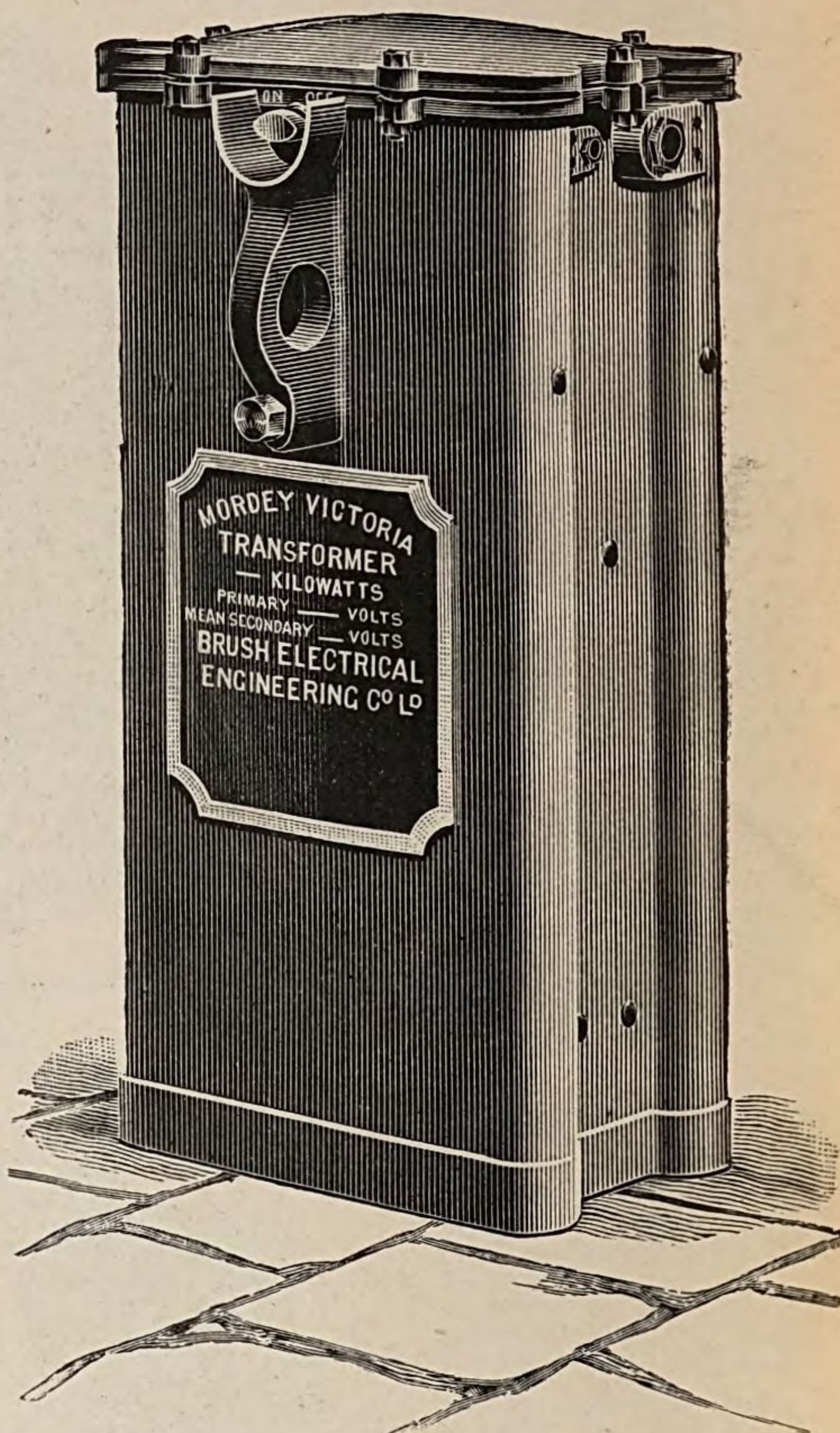


Fig. 117.

Die Leitungen werden durch isolierte Stopfbüchsen eingeführt. Der Spannungsabfall bei induktionsfreier Belastung wird von der Firma zu $2\frac{1}{2}\%$ für alle Größen angegeben. Der Hysteresisverlust bei $\infty = 100$ schwankte zwischen 6% bei der kleinsten Type von 750 Watt und $0,75\%$ bei der größten von 50 Kwt. Die folgende Tabelle gibt das Gewicht einschließlic des Kastens für verschiedene Größen:

Leistung in Kwt	1,5	3	6	12	24	50
Gewicht in kg	132	247	359	559	863	2083

Die Hoch- und Niederspannungswickelung sind durch ein Metallschild, welches mit der Erde in leitender Verbindung steht, getrennt, so daß ein Übertreten der hohen Spannung in die Niederspannungsspule nicht möglich ist. (Vgl. achtes Kapitel — Sicherheitsmaßregeln.)

Johnson & Phillips in London bauen den vom Verfasser konstruierten Transformator. Die Einzelheiten dieser Konstruktion

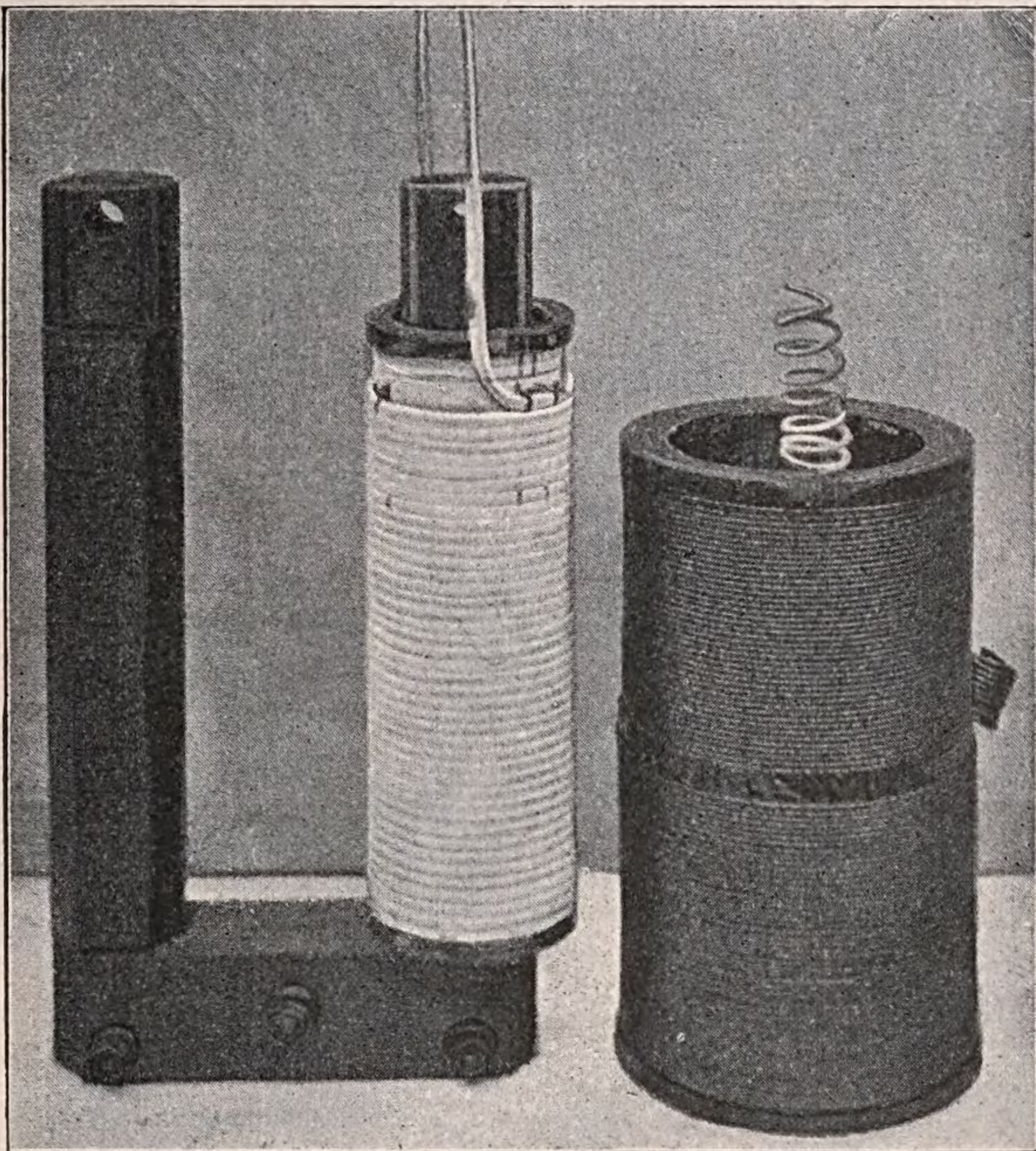


Fig. 118.

sind aus den Fig. 41 bis 44 zu ersehen und bedürfen daher keiner eingehenden Beschreibung. Fig. 118 zeigt Teile eines 2 Kwt.-Transformators, und Fig. 119 zeigt eine Gesamtansicht eines 10 Kwt.-Transformators und des dazugehörigen Kastens.

Ganz & Co. in Budapest bauen Manteltransformatoren mit kurzem Kern (Fig. 120). Der Eisenkörper besteht aus E-förmigen Blechen, die in starken Endplatten entsprechend gehalten und

mittels Schraubenbolzen zusammengepresst werden. Die Endplatten sind kreisrund, so daß der Apparat auf dem Boden gerollt werden

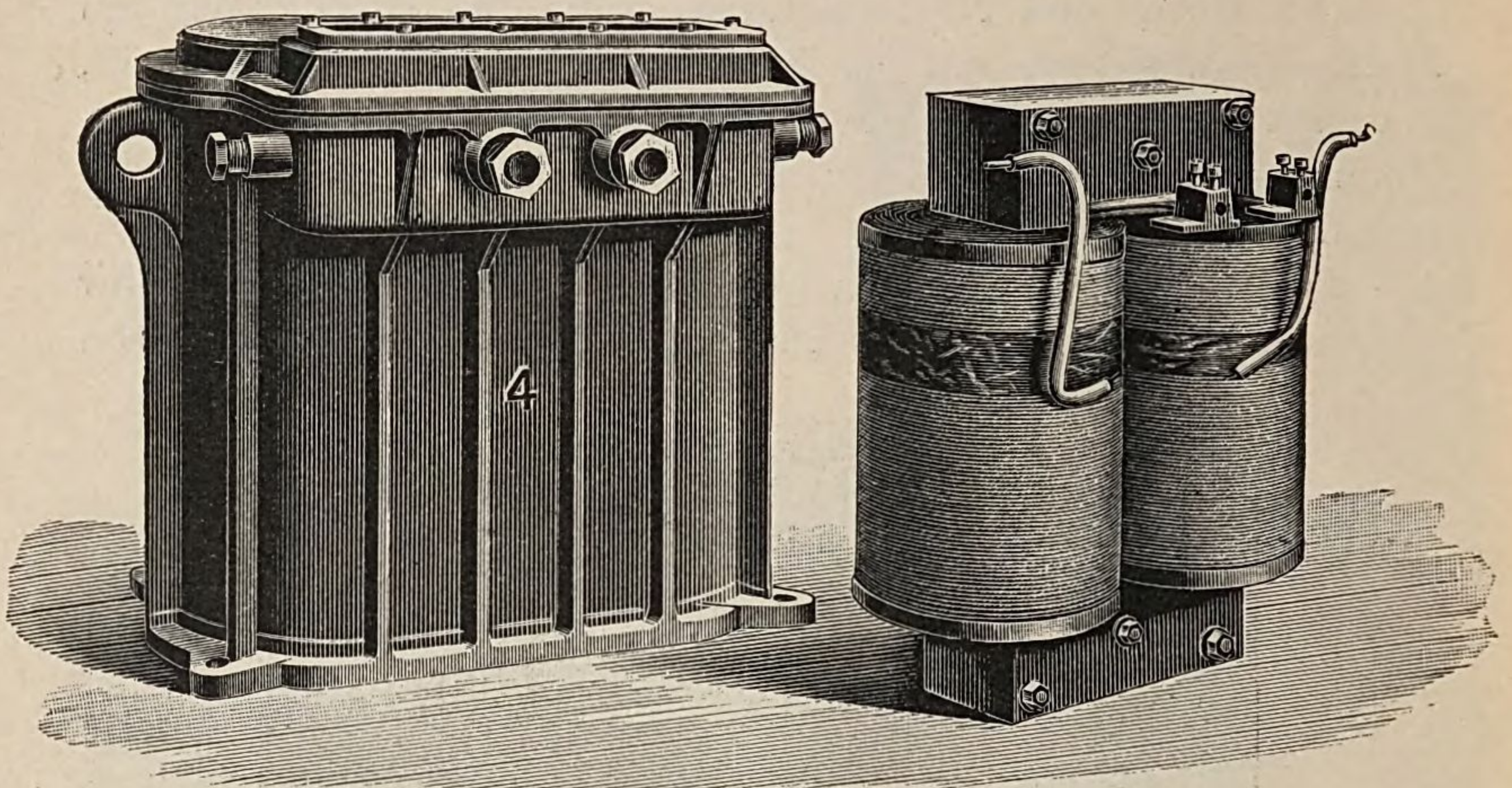


Fig. 119.

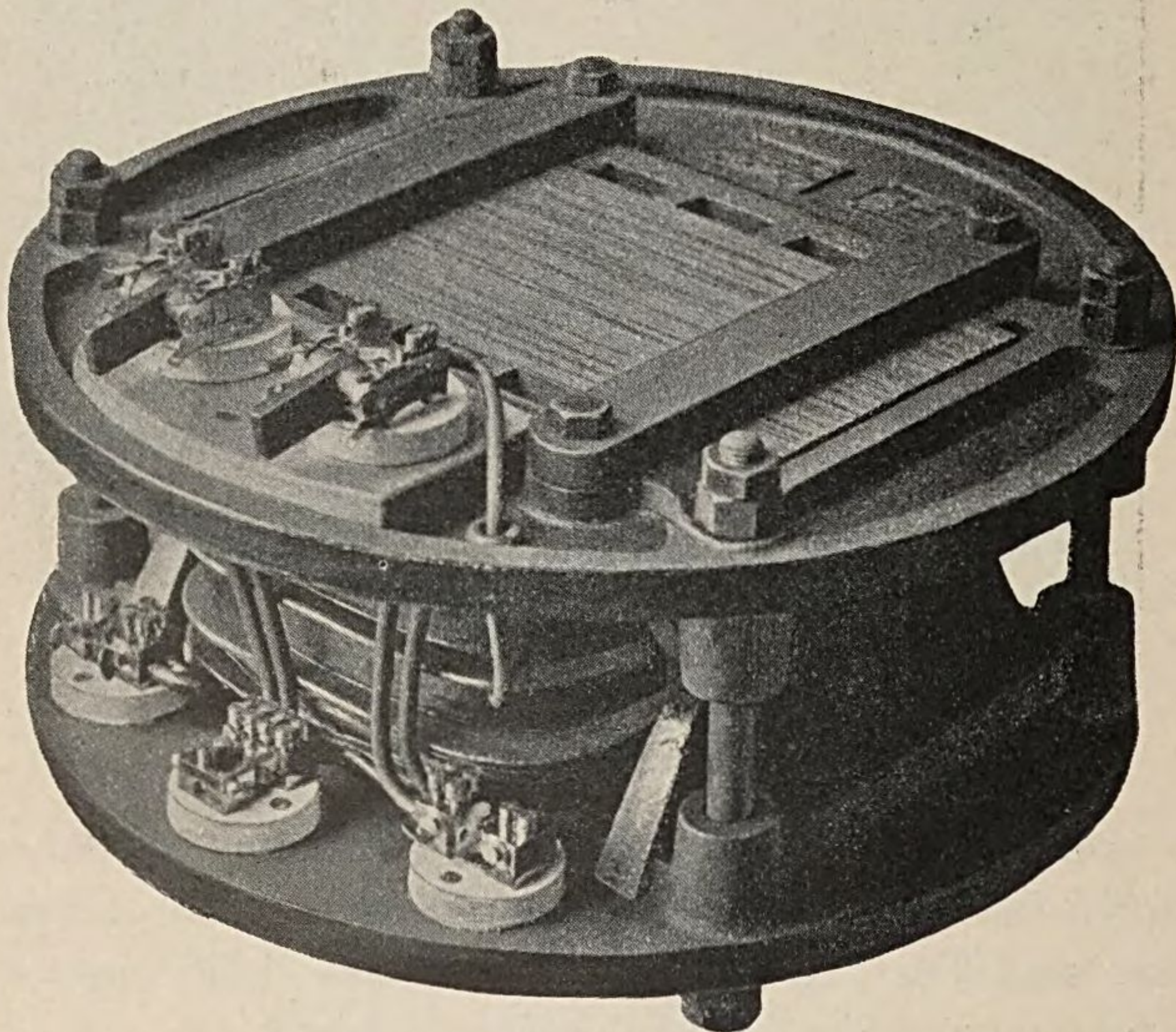


Fig. 120.

kann, ohne Schaden zu nehmen. Die Klemmen sind auf Porzellanunterlagen montiert, und jene für die Hochspannungswickelung

sind mit Abschmelzsicherungen versehen. Die Drähte sind auf besonderen, aus Prefsspahn hergestellten Spulenträgern gewickelt, wodurch eine vorzügliche Isolation erzielt wird. Die Wickelungen

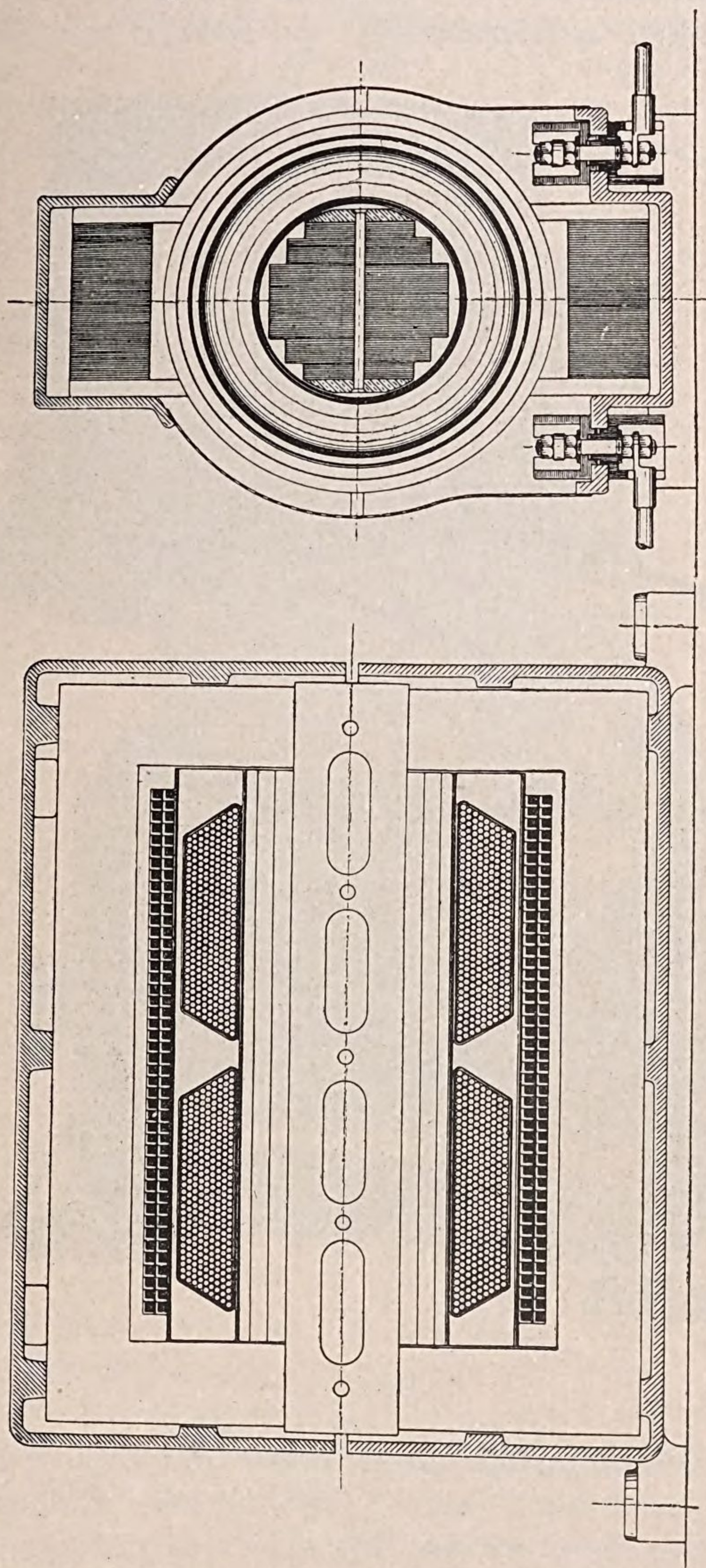


Fig. 121.

sind behufs Verminderung der Streuung unterteilt, wodurch die einzelnen Spulen die Form von flachen und breiten Scheiben erhalten.

Die Maschinenfabrik Oerlikon baut sowohl Einphasen- als auch Mehrphasen-Transformatoren; die ersteren nach der Mantel-

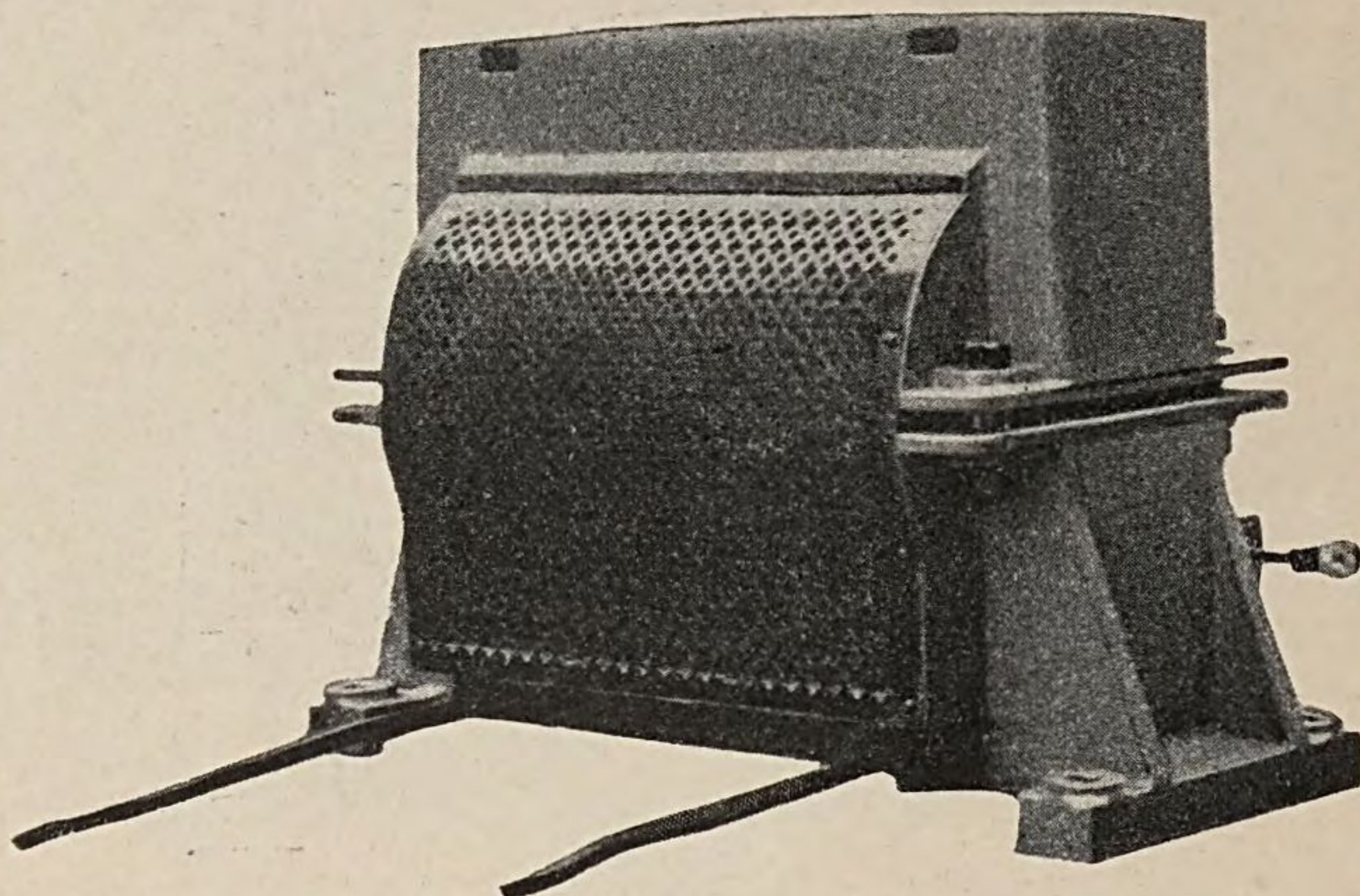


Fig. 122.

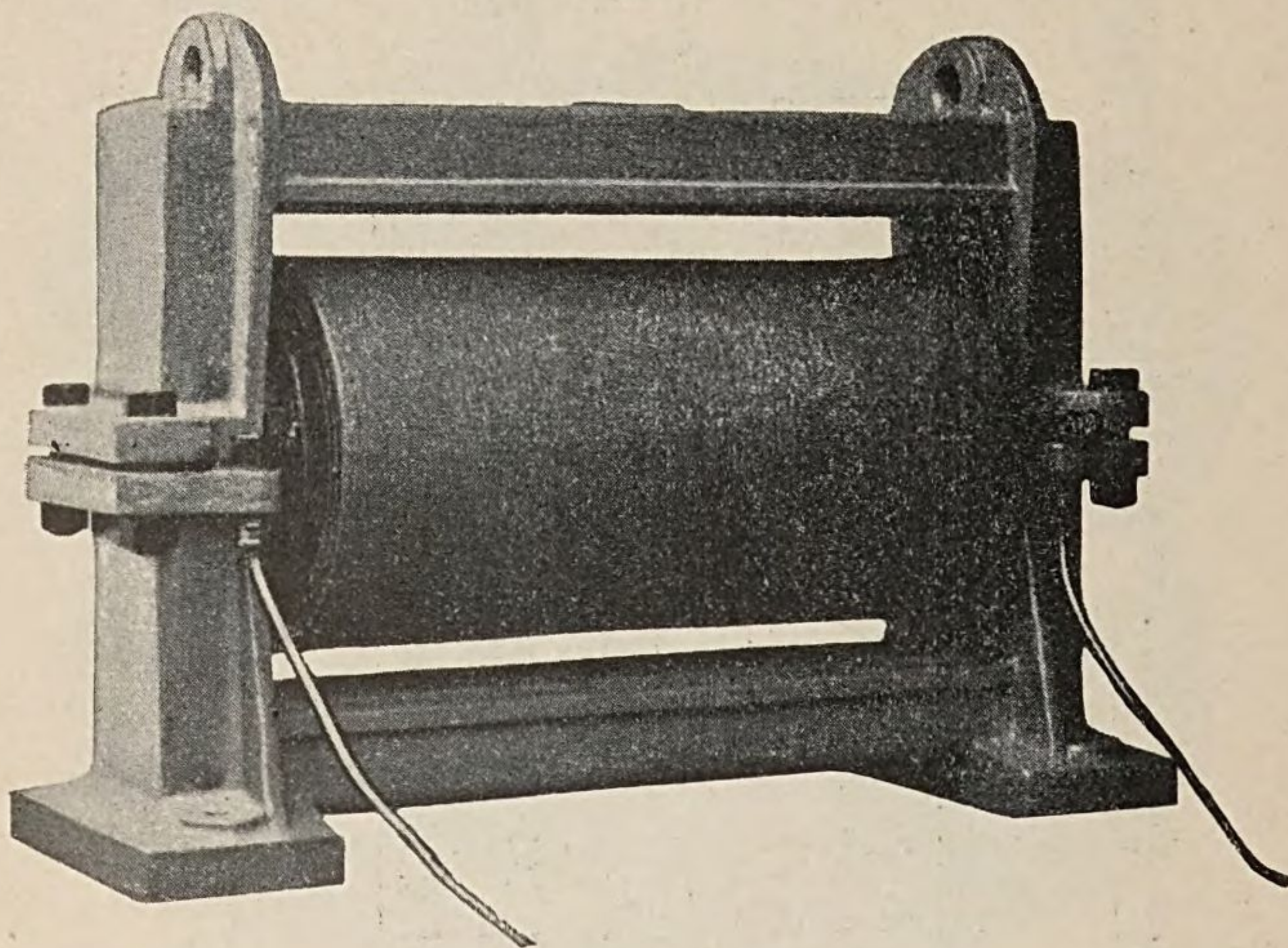
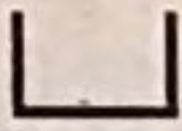


Fig. 123.

type mit langem Kern, die letzteren nach der Kerntype. Fig. 121 zeigt die Konstruktion eines gewöhnlichen Einphasen-Transformators. Der Kern ist aus Blechen verschiedener Breite zu-

sammengesetzt, die so abgestuft sind, daß der Querschnitt des Kernes einem Kreis möglichst nahe kommt. Die Bleche werden seitlich durch Messingplatten und Bolzen zusammengehalten, und der Kern ist an den Enden beiderseits soweit eingeschnitten, daß die Verbindung mit den förmigen Jochblechen über seine ganze Breite stattfindet. Die Spulen sind unabhängig von einander auf Papiercylinder gewickelt, wobei die Dimensionen so gewählt sind,

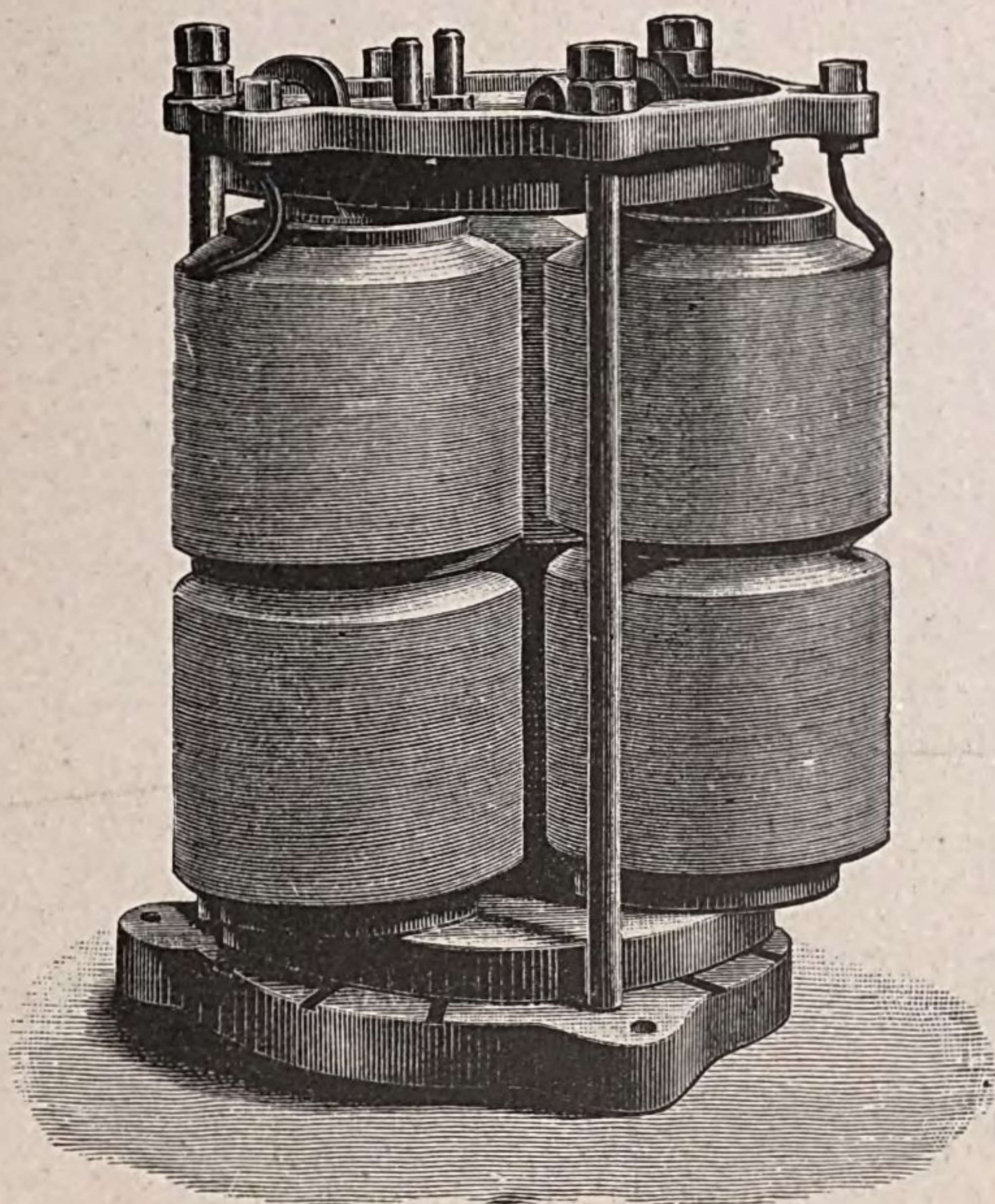


Fig. 124.

daß die Spulen bequem aufgeschoben werden können. Die Joche werden in den zwei Hälften eines gußeisernen Kastens gehalten und durch Schraubenbolzen gegen den Kern gedrückt. Zum Schutz der Spulen wird der Kasten zu beiden Seiten mittels perforierten Bleches abgedeckt, wie das Fig. 122 zeigt. Fig. 123 zeigt eine ähnliche Konstruktion, jedoch ohne Schutzbleche.

Für Drehstrom baut die Firma zwei Typen, die eine mit kreisförmigen Jochen, Fig. 124 und 125, und die andere mit geraden Jochen, Fig. 126. Theoretisch genommen ist die erstere Anordnung vorzuziehen, weil dabei die Länge des magnetischen Pfades

für alle drei Phasen genau gleich ist und mithin vollkommene Symmetrie besteht; vom praktischen Standpunkt aus ist dieser Vorteil jedoch nicht wesentlich. Der magnetische Widerstand des Joches selbst ist gegenüber jenem der Stösfugen so unbedeutend,

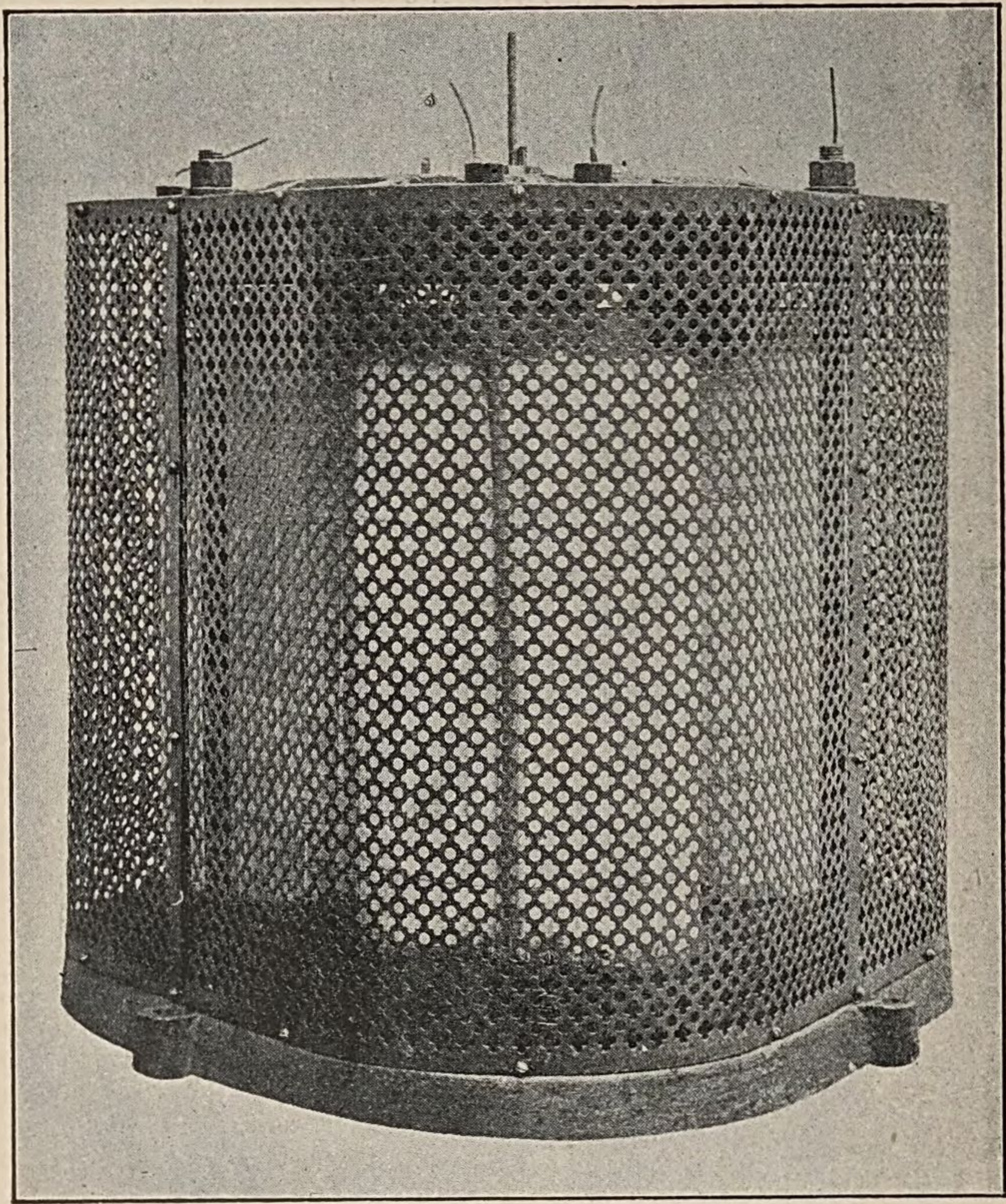


Fig. 125.

daß der Mangel an Symmetrie bzw. die Verschiedenheit in der Länge des magnetischen Pfades bei der Konstruktion Fig. 126 gar nicht ins Gewicht fällt. Andererseits ist diese Konstruktion in der Ausführung etwas bequemer.

Die Firma Electric Construction Company Ltd. in Wolverhampton war eine der ersten in England, welche sich mit dem Bau von Transformatoren beschäftigte, und zwar nach der Manteltype, welche sie bis heute beibehalten hat. Während

ihre ersten Ausführungen ziemlich stark an amerikanische Konstruktionen erinnerten, hat sie nunmehr interessante Neuerungen eingeführt, welche eine bessere Ausnützung des Materiales und

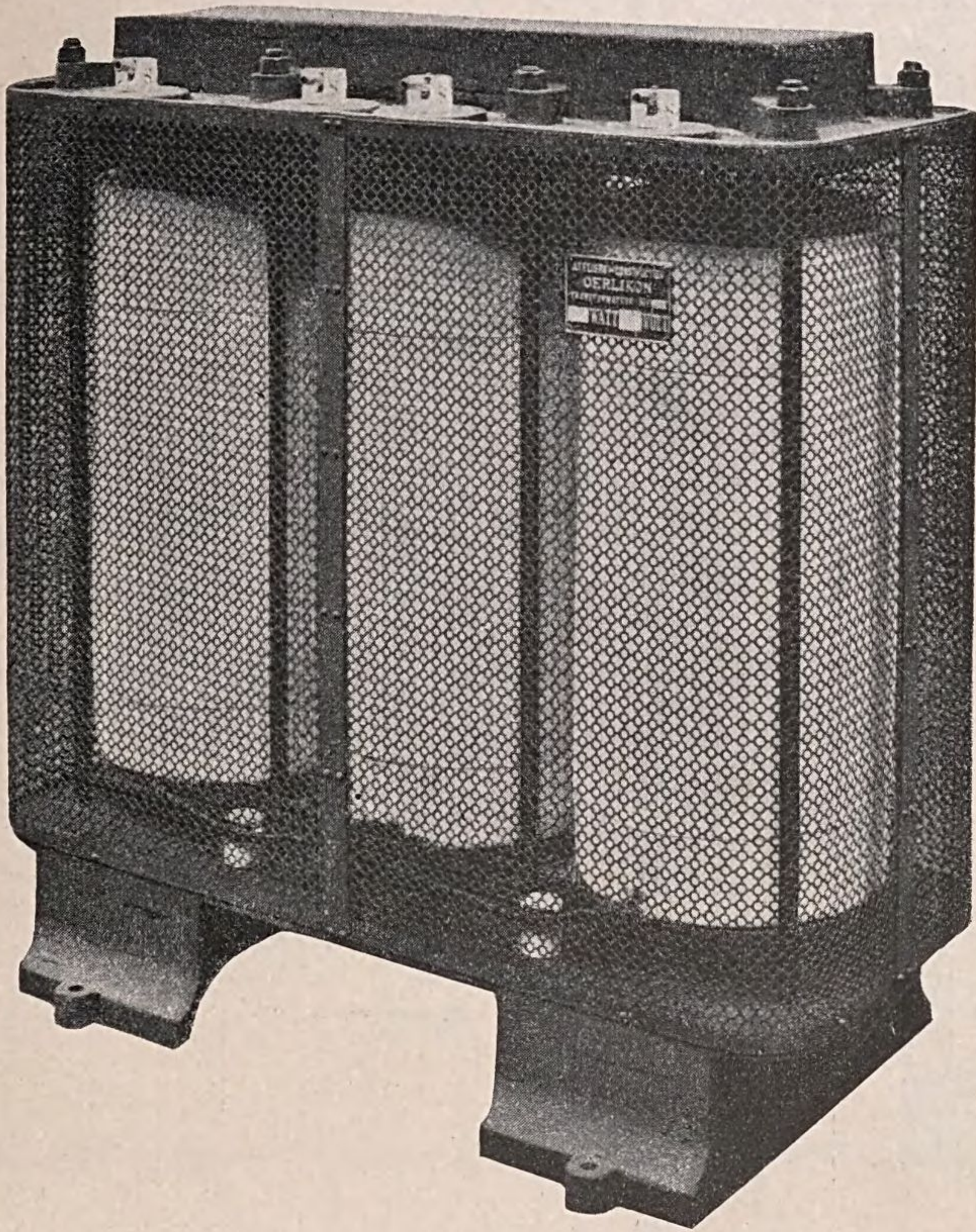


Fig. 126.

einen höheren Wirkungsgrad zum Zwecke haben. Fig. 127 stellt einen 10 Kwt.- und Fig. 128 einen 40 Kwt.-Transformator dar. Die Spulen sind ziemlich lange Rechtecke, d. h. der Eisenkörper ist im Vergleich zur Kerndicke lang, und in dem größeren Apparat ist ein Versuch gemacht worden, die Leistung mit einem möglichst geringen Aufwand von Eisenblech zu erreichen. Zu diesem Zwecke sind die Querschnitte der Spulen so gewählt, daß sie einen Kreis genau ausfüllen.

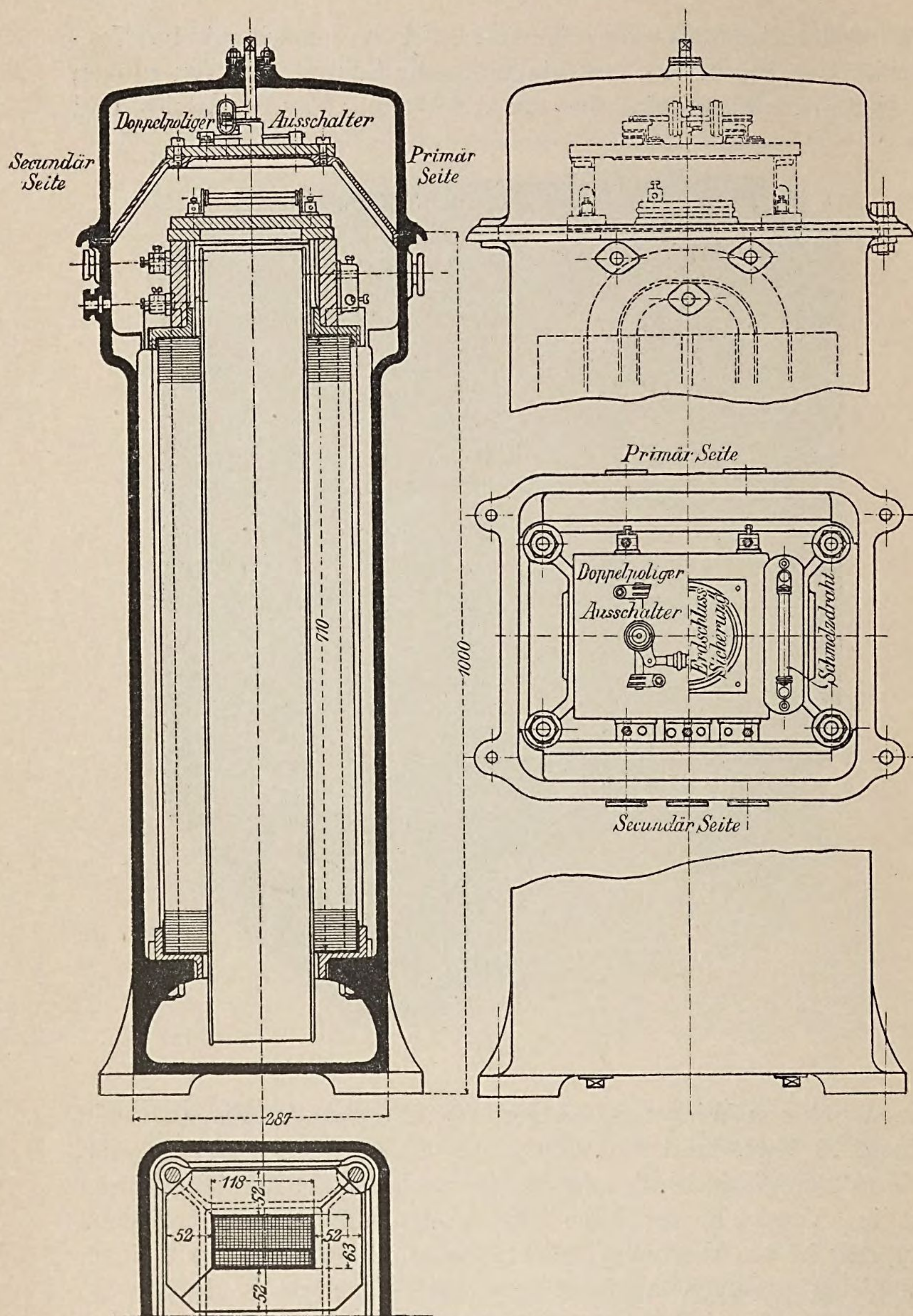


Fig. 127.

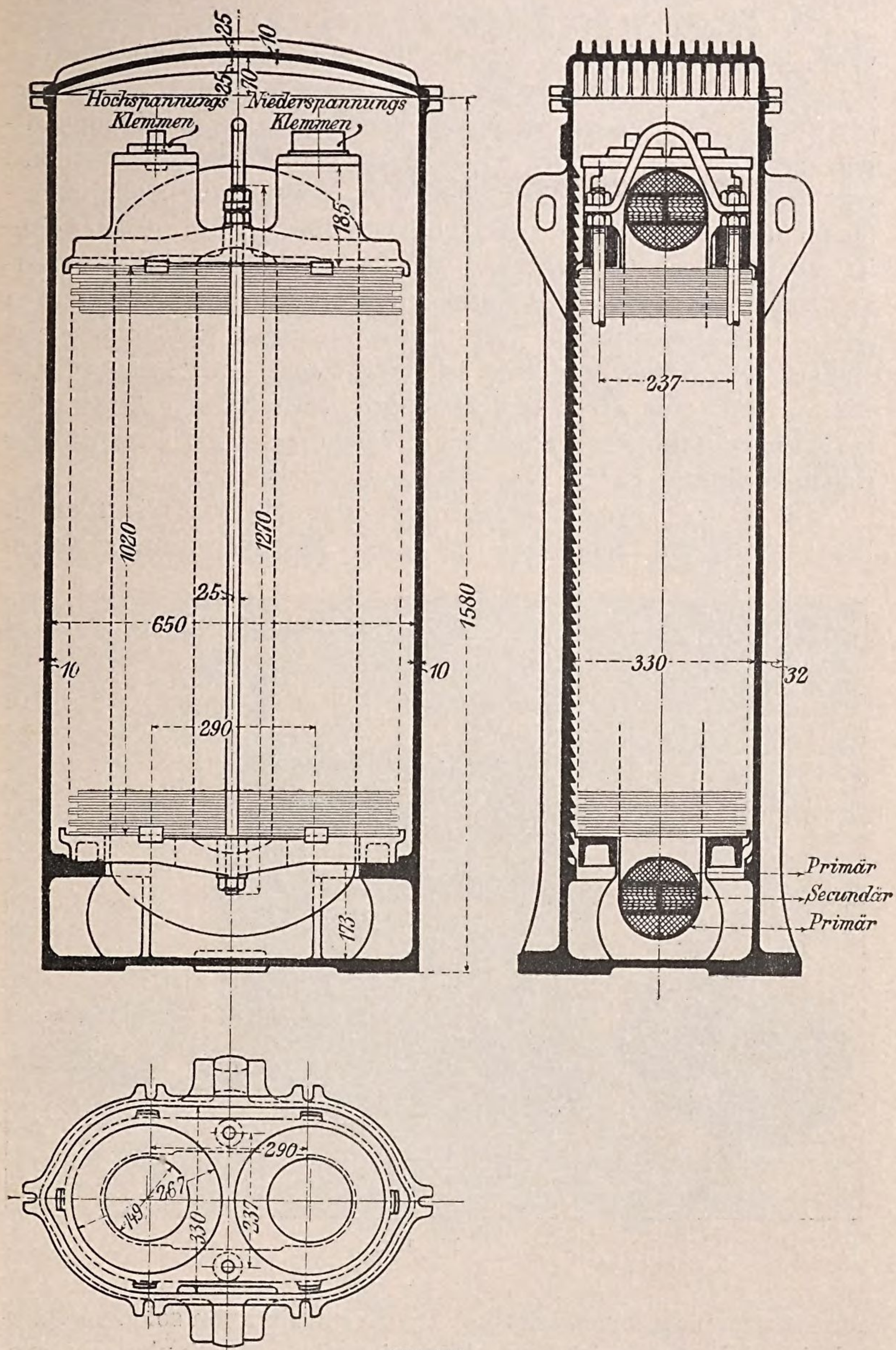


Fig. 128.

Das Fenster in den Blechscheiben ist also hier nicht rechteckig, sondern kreisrund, und die Bleche selbst sind kreisförmige Scheiben. Alle Scheiben haben den gleichen inneren Durchmesser, der äußere Durchmesser ist jedoch verschieden, und bei dem Aufbau des Eisenkörpers wird abwechselnd eine Partie kleinerer und eine Partie größerer Scheiben eingeführt, wodurch die Abkühlungsfläche des Eisenkörpers bedeutend vergrößert wird. Gleichzeitig ist die Fähigkeit des Gehäuses, Wärme aufzunehmen und weiterzuleiten, dadurch gesteigert worden, daß die Innenfläche mit feinen Rippen versehen wurde. Diese Transformatoren werden aufrecht stehend angeordnet, und zwar ist das Gehäuse hoch genug, damit Raum bleibt für einen doppelpoligen Ausschalter, Abschmelzsicherungen und eine Cardew'sche Sicherung gegen Übertritt der hohen Spannung in die Niederspannungswickelung.

Die Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft in Berlin baut sowohl für Einphasen- als auch Mehrphasenstrom Trans-

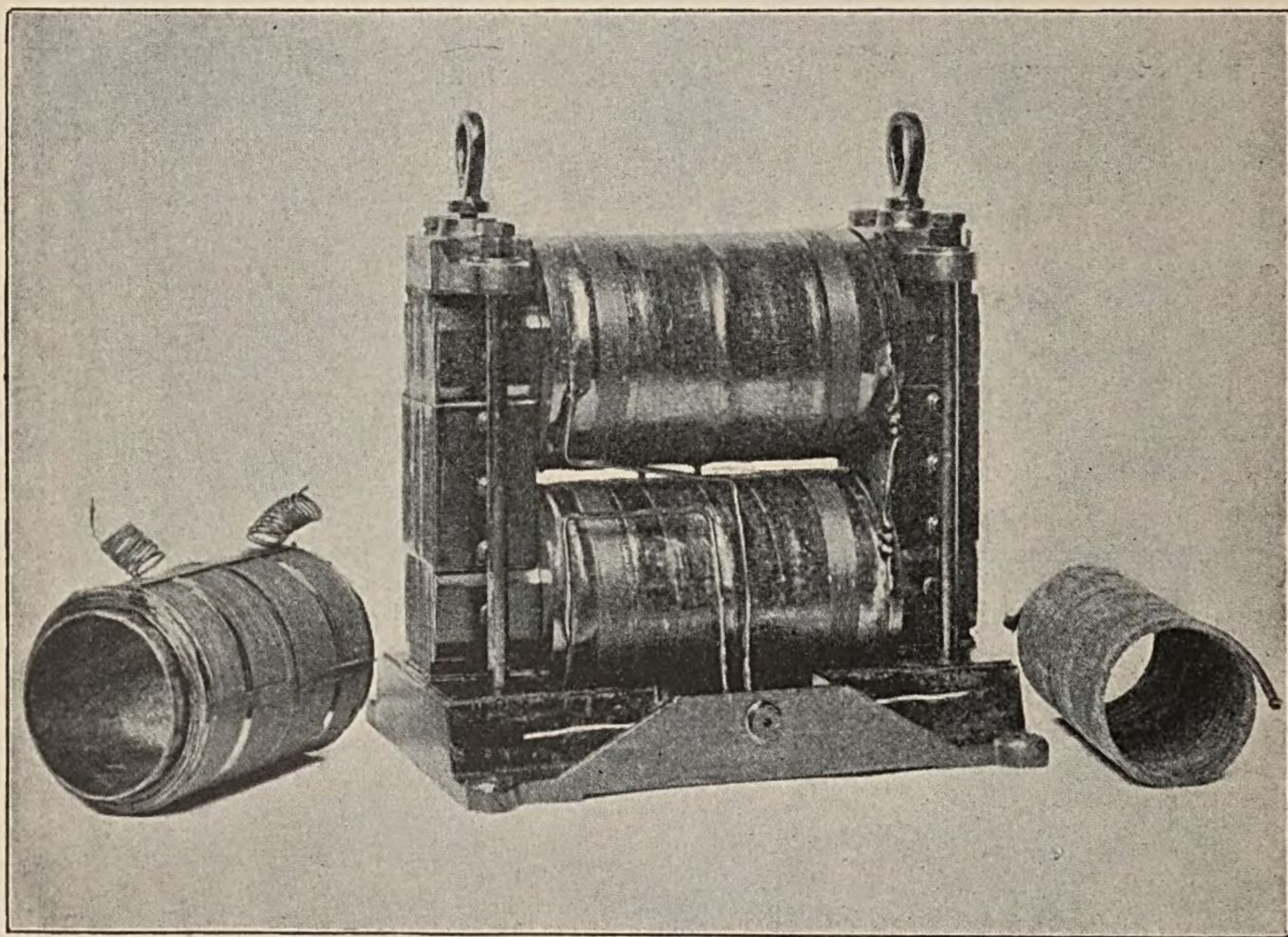


Fig. 129.

formatoren nach der Kerntype. Die Kerne sind von solchem Querschnitt, daß der kreisförmige Raum innerhalb der Spulen gut aus-

genützt wird. Der Querschnitt wird durch die seitlich angelegten und zur Verbindung der Bleche dienenden Metallplatten teilweise zu einem Kreis ergänzt. An den Enden sind die Kerne eingeschnitten, um die Breite der Stosfuge gleich der vollen Dicke des Kernes zu machen. Die Jochstücke sind in gleicher Weise durch Seitenplatten und Bolzen zusammengehalten und von rechteckigem oder quadratischem Querschnitt. Die Sekundärspulen werden bei den kleineren Transformatoren nicht auf Papiercylinder, sondern ohne solche Unterlage gewickelt und auf die stark isolierten Kerne einfach aufgeschoben, was eben durch den nahezu kreisförmigen Querschnitt der Kerne möglich gemacht wird. Dadurch wird die mittlere Windungslänge in beiden Wickelungen auf das thunlichst kleinste Maß gebracht. Die Primärspulen werden auf Cylinder aus Mikanit gewickelt und mit möglichst wenig Spielraum über die Sekundärspulen geschoben. Die Entfernung zwischen dem äußeren Radius der Sekundär- und dem inneren Radius der Primärspule beträgt nur etwa 5 mm. Infolgedessen ist auch die Streuung und der Spannungsabfall sehr gering. Fig. 129 zeigt einen 10 Kwt.-Transformator und Teile desselben. Dieser Apparat wurde nach der Methode des Verfassers von Herrn v. Dolivo-Dobrowolsky auf seine Streuung untersucht. Der ohmsche Widerstand bedingt einen Spannungsverlust von 2%, während die gesamte Spannung bei Kurzschluß nur 4% von der normalen Betriebsspannung ausmacht. Der aus diesen Zahlen mittels des Vektordiagrammes bestimmte Spannungsabfall bei Vollbelastung ist

für $\varphi = 0^\circ$		2,3%
» $\varphi = 60^\circ$		4,0%
» $\varphi = 90^\circ$		3,9%.

Fig. 130 zeigt einen Drehstromtransformator und Teile desselben. Diese Type hat eine Leistung von 40 Kwt. und ist in der Drehstromanlage zur Beleuchtung von Straßburg i. E. in Verwendung. Um den Spannungsabfall noch kleiner zu machen, sind die Spulen nicht ineinander, sondern in der Form von flachen Scheiben nebeneinander angebracht, und zwar ziemlich viele von jeder Art. Die Kurzschlußspannung beträgt hier nur 3% von der vollen Betriebsspannung; der Spannungsabfall kann also selbst bei Belastung mit Motoren 3% nicht übersteigen. Die Spulen beider Stromkreise

sind in Träger von Mikanit gewickelt, wodurch eine vorzügliche Isolation erzielt wird. Beide hier illustrierte Typen von Transformatoren werden durch perforierte Schutzbleche abgedeckt; diese

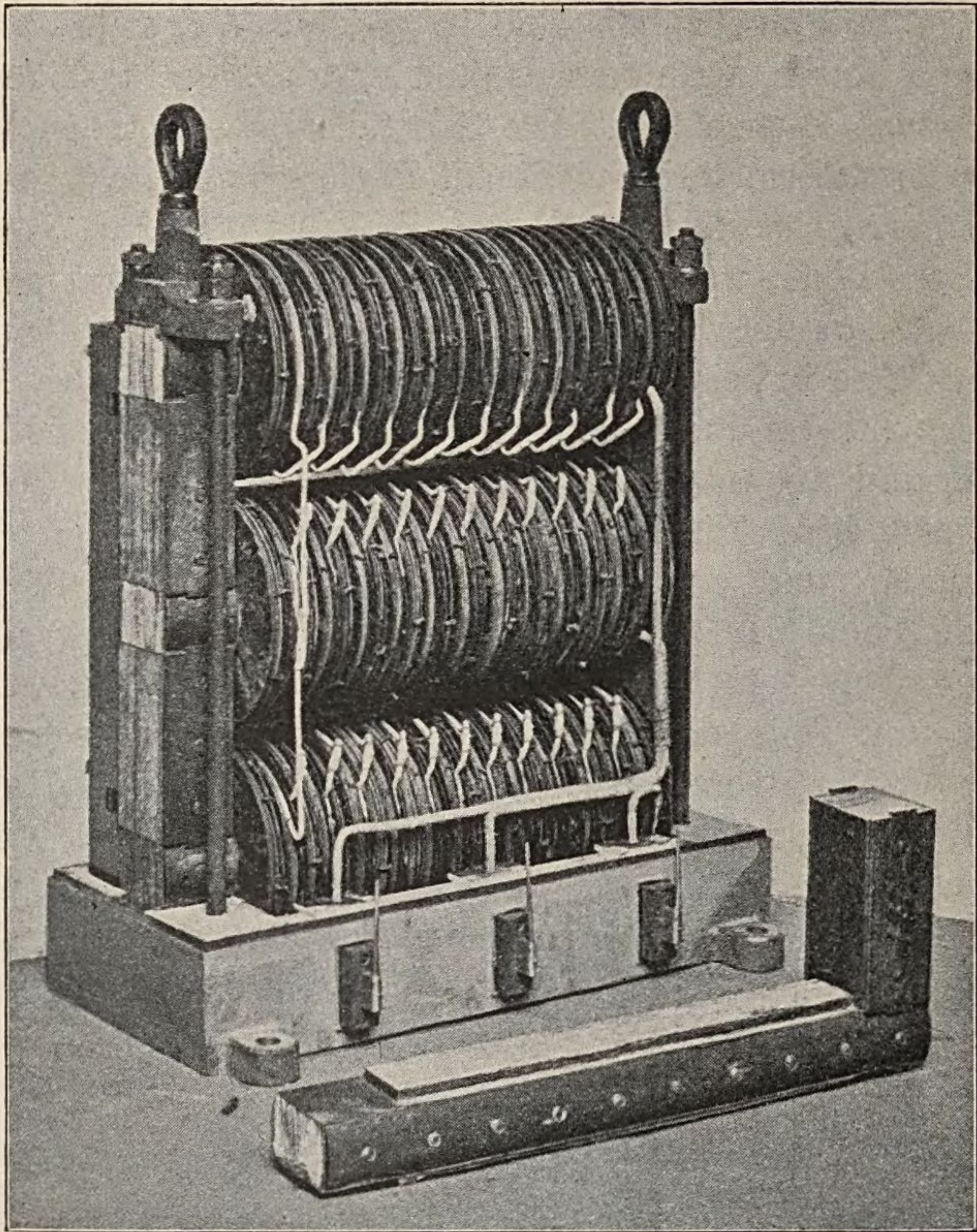


Fig. 130.

Bleche sind jedoch in den Illustrationen fortgelassen, um die Konstruktion deutlicher zeigen zu können.

Die neuesten von der Westinghouse Electric & Manufacturing Company zu Pittsburg ausgearbeiteten Konstruktionen sind in Fig. 131 bis 133 dargestellt. Fig. 131 stellt die für Beleuchtungszwecke angenommene Normaltype dar, die bis zu 30 Kwt. gebaut wird. Der Kern ist kurz und seine Dicke senkrecht zu den Blechen gemessen auch verhältnismäßig klein, so

dafs ein ziemlich grofser Teil der Spulen frei liegt und durch die Luft gekühlt wird. Um diese Kühlung noch wirksamer zu machen, sind die Spulen an diesen Stellen auseinander gebogen. Die Luft

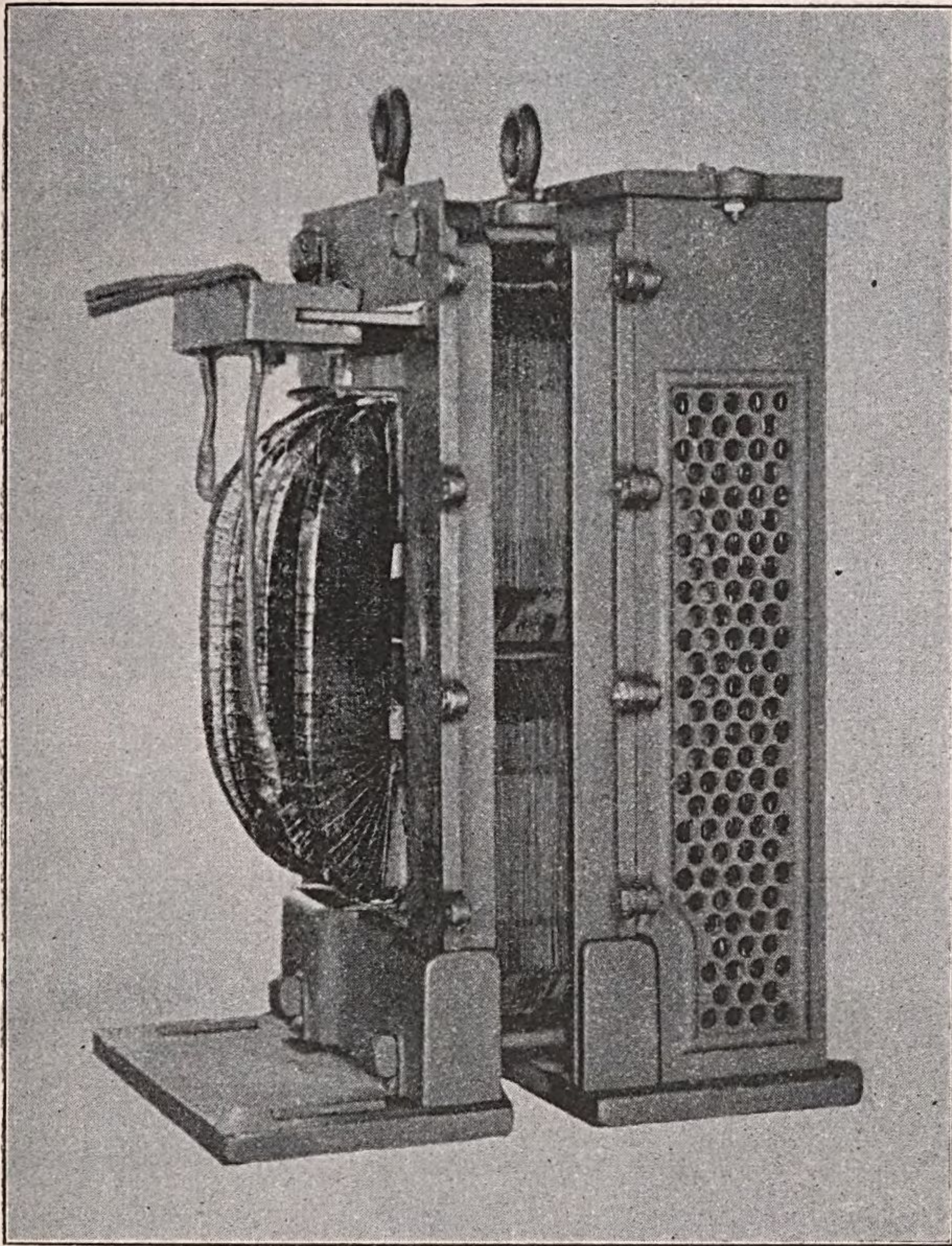


Fig. 131.

findet also nicht nur an den Aussenflächen, sondern auch zwischen den Spulen Zutritt. Der Eisenkörper wird durch starke gusseiserne Rahmen zusammengehalten, und zum Schutz der Spulen sind beiderseits perforierte gusseiserne Gehäuse angebracht. Eines derselben ist jedoch in der Illustration weggelassen. Die anderen zwei Illustrationen stellen die 100 Kwt.-Transformatoren dar, welche bei der Niagara-Anlage Verwendung finden. Das Umsetzungsverhältnis ist 2000 zu 150 Volt, jedoch ist die Wickelung so eingerichtet,

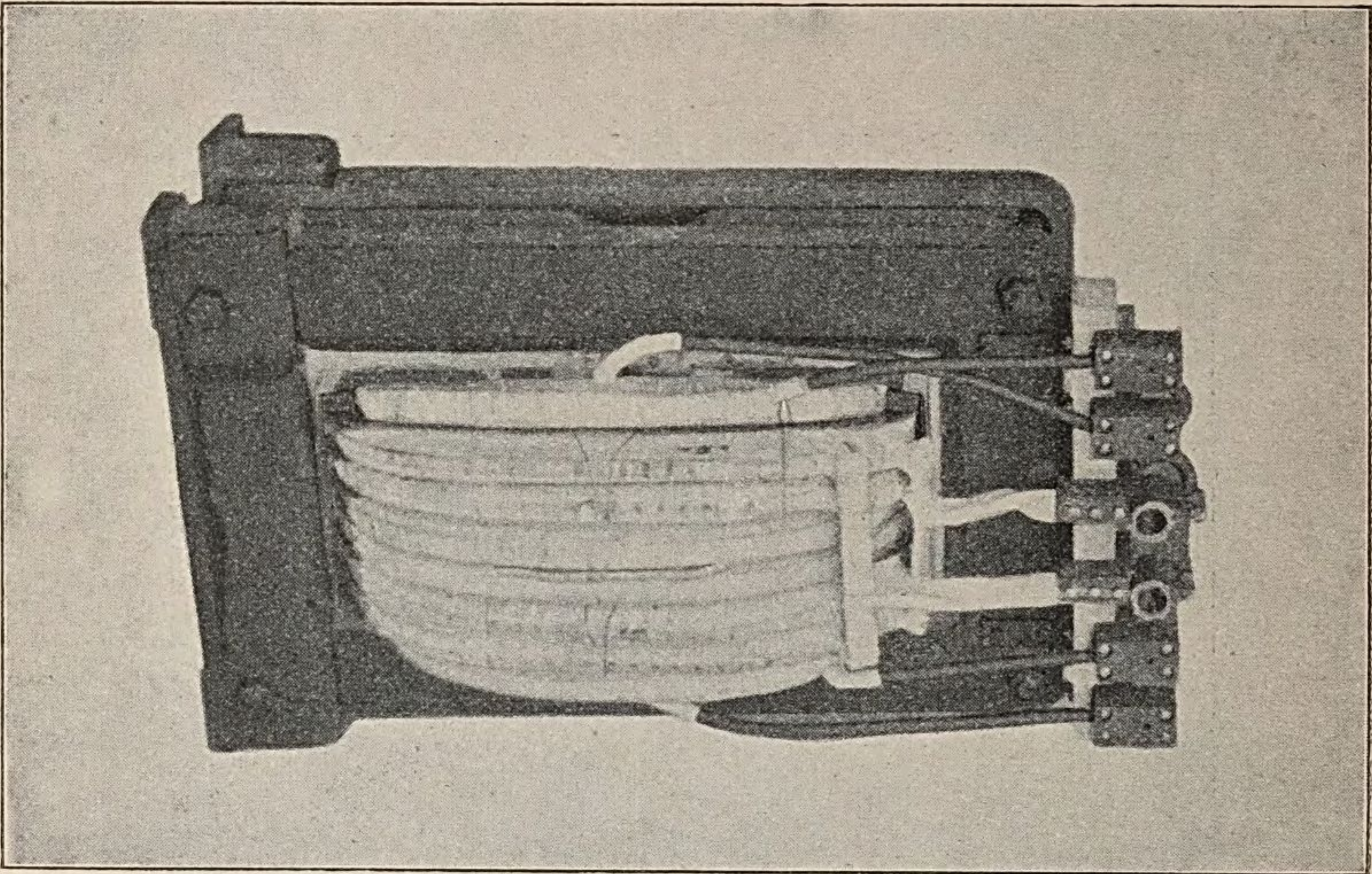


Fig. 132.

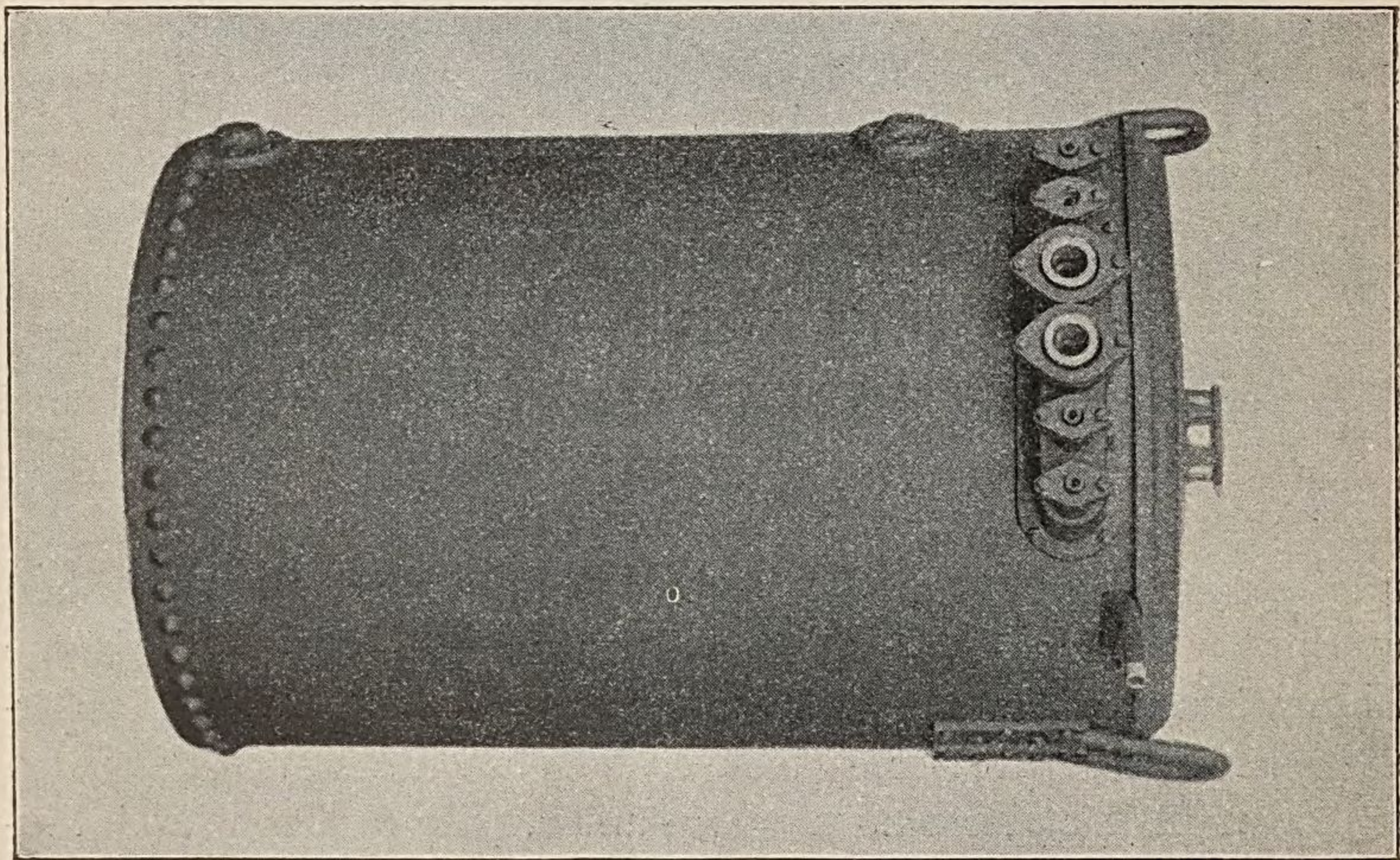


Fig. 133.

dafs dasselbe etwas geändert werden kann, zu welchem Zwecke das zweite Paar von primären Klemmschrauben vorgesehen ist. Die primären und sekundären Windungen sind in je vier Spulen angeordnet. Die letzteren sind in Parallelschaltung verbunden, die ersteren in Serienschaltung. In der Mitte des Kernes sind zwei Primärspulen; dann kommen zu jeder Seite zwei Sekundärspulen und schliesslich wieder je eine Primärspule ausserhalb der letzteren. Die Spulen sind, wie schon oben beschrieben, auseinander gebogen; die Kühlung erfolgt aber nicht durch Luft, sondern durch Öl, zu welchem Zwecke der Transformator in ein cylindrisches Gehäuse eingebaut ist (Fig. 133). Die Zuleitungen gehen durch Stopfbüchsen. Um das Öl selbst wirksam zu kühlen, ist das Gehäuse an seiner inneren Wandung mit einem schmiedeisernen Spiralrohr, einer sog. Kühlschlange, ausgestattet, durch welche ein Strom kalten Wassers geleitet wird.

Sach-Register.

- A**bkühlungsfläche, Abhängigkeit zwischen Temperaturerhöhung und — eines Transformators 43.
Absorptionsmethoden für Energiemessung 133.
Aktives Material, Kosten desselben 77.
Allgemeine Elektrizitätsgesellschaft, Transformator der — 196.
Arbeit eines Wechselstromes, 12. 53 u. ff., Messung der — 120 u. ff.
Arbeitsdiagramme von Transformatoren 87 u. ff.
Arbeitsverluste, Erwärmung der Transformatoren durch — 40.
Ausgleichsspulen für in Serie geschaltete Lampen 167.
Ausgleichstransformator 169.
Ayrton, Drei-Voltmeter-Methode 134.
- B**aumwollumspinnung, Dicke der — 86.
Belastung, Arbeitsdiagramm für — 90.
Berliner Maschinenbau-Aktiengesellschaft vorm. L. Schwartzkopff, Transformator der — 180.
Blakesley, Bestimmung der Arbeitsleistung eines Wechselstromes 58.
Bleche für Transformatoren, Stärke der — 17, Untersuchung der — 142, Apparat zur Untersuchung der — von v. Dolivo-Dobrowolsky 144, von Kapp 145, von Ewing 146.
Booster (Spannungserhöher) 158.
Brown, Boveri & Co., Transformator von — 181.
Brush Electrical Engineering Co., Transformator der — 183.
- C**ardew, Sicherung für Transformatoren 151.
Crompton, Transformator von — 34.
- D**imensionen des Eisenkörpers von Transformatoren 38, Einfluß der linearen — auf die Leistung und den Wirkungsgrad 44.
Dobrowolsky, v. Dolivo-, Apparat zur Untersuchung der Transformatorbleche 144, Untersuchung eines Transformators nach Kapp's Methode 197.
Drei-Ampèremeter-Methode 136.
Dreileitersystem, Verwendung von Transformatoren im — 169.
Drei-Voltmeter-Methode 134.
Drosselspulen 30. 162.
Dynamometer 120.
- E**ffekt, Ausdruck für den — 12, Messung des — 120 u. ff.
Effektiver Wert der Stromstärke bei Wechselströmen 11, der Span-

- nung 13, Messung der effektiven Werte 120 u. ff.
- Einzeltransformatoren und Unterstationen, Vergleich zwischen — 153.
- Eisenkörper, Konstruktion des — von Transformatoren 32, Dimensionen des — 38.
- Electric Construction Company, Transformator der — 192.
- Elektricitätsaktiengesellschaft, vorm. Schuckert & Co., Transformator der — 176.
- Elektricitätsaktiengesellschaft, vorm. W. Lahmeyer & Co., Transformator der — 183.
- Energiemessung, mittels Dynamometer 120, mittels Wattmeter 123, nach anderen Methoden 133.
- Erwärmung der Transformatoren 40, Messung der — 142.
- Ewing, Apparat zur Untersuchung von Blechen 146.
- F**erranti, Transformator von — 33, Sicherung für Transformatoren 152.
- Fleming, Drei-Ampèremeter-Methode 136.
- G**anz & Co., Transformator von — 187.
- Grundgleichung, Ableitung der — 8.
- H**ysteresis, Arbeit der — 15, Einfluß der Spannungskurve auf die — 18, Verhältnis von Hysteresisverlust und Stromwärme 78 u. ff.
- I**geltransformator 29.
- Isolation der Transformatorbleche 25, Messung der — 142.
- Johnson & Phillips, Transformator von — (Kapp) 187.
- K**app, Transformator von — 34. 83 u. ff. 117, Methode zur Vorausbestimmung des Spannungsabfalles 117, Apparat zur Untersuchung von Blechen 145, Spannungserhöher 158.
- Kerne der Transformatoren, Einfluß der Form der — auf die Verluste 23.
- Kerntransformatoren 25. 31.
- Konstruktion eines Transformators 70 u. ff.
- Kosten des aktiven Materials bei Transformatoren 77.
- Kupfergewicht bei Transformatoren, Günstigste Verteilung des — 72.
- L**ahmeyer & Co., Transformator von — 183.
- Leerlauf von Transformatoren, Arbeitsdiagramm für — 87.
- Leerlaufstrom, Bestimmung des — 63, Einfluß der Stosfugen auf den — 68.
- Leistungsfaktor 89.
- Leistung und Wirkungsgrad von Transformatoren in ihrer Abhängigkeit von den linearen Dimensionen 44.
- M**agnetische Streuung 3, Ihr Einfluß auf das Arbeitsdiagramm 92 u. ff.
- Magnetisierungsstrom, Ausdruck für den — 65. 67.
- Manteltransformatoren 25. 30.
- Maschinenfabrik Oerlikon, Transformator der — 190.
- Messung der effektiven Stromstärke 120, des Effekts 123. 133, der Phasenverschiebung 127, von unregelmäßigen Strömen 127.
- Mordey, Transformator von — 35. 183.

- N**acheilung zwischen Strom und Spannung 54.
- Niagara-Kraftübertragung, Transformator für dieselbe 199.
- O**erlikon, Transformator der Maschinenfabrik — 190.
- P**ermeabilität, Kurve der — 18.
- Phasenverschiebung zwischen Strom und Spannung 54, Messung der — 127.
- Prüfung der Transformatoren 139.
- S**chuckert & Co., Transformator von — 176.
- Schwartzkopff & Co., Transformator von — 180.
- Scott's System der Stromverteilung 172.
- Serienschaltung, Verwendung von Transformatoren bei — von Lampen 163.
- Sicherung für Transformatoren, von der Thomson-Houston Co. 150, von Cardew 151, von Ferranti 152.
- Siemens Brothers & Co., Transformator von 180.
- Siemens & Halske, Transformator von — 173.
- Spannung, effektiver Wert der — 13, Messung des — 120 u. ff.
- Spannungsabfall 100 u. ff., graphische Bestimmung des — 102 u. ff.
- Spannungserhöher 158.
- Spannungskurve, Einfluß der — auf den Hysteresisverlust 18.
- Spulen, Anordnung der — beim Transformator 7, Einfluß der Form der — auf die Verluste 23.
- Steinmetz, Ausdruck für die Hysteresisarbeit 15.
- Stillwell, Spannungserhöher 158.
- Stoßfugen im Transformatorkern 37, Einfluß der — auf den Leerlaufstrom 68.
- Streufeld, graphische Darstellung desselben 6.
- Streuung, magnetische — 3, Einfluß der — auf das Arbeitsdiagramm 92 u. ff.
- Stromstärke, Messung der effektiven — 120 u. ff.
- Swinburne, Igeltransformatoren 29.
- T**emperaturkurve 42. 43.
- Thomson-Houston Co., Sicherung für Transformatoren 150.
- Transformator, Wesen des — 1, Kern- und Manteltransformatoren 25, Igeltransformatoren 29, gebräuchliche Formen der Transformatoren 30, Konstruktion des Eisenkörpers 32, Transformatoren von Westinghouse 33. 198, von Ferranti 33, von Kapp 34. 187, von Crompton 34, von Mordey 35. 183, Dimensionen des Eisenkörpers 40, Erwärmung 40. 142, Einfluß der linearen Dimensionen auf Leistung und Wirkungsgrad 44 u. ff., Leerlaufstrom 63. 68, Konstruktion 70 u. ff., wirtschaftlicher Betrieb 80 u. ff., Konstruktionsdetails 82, Arbeitsdiagramme 87 u. ff., Leistungsfaktor 89, Spannungsabfall und graphische Bestimmung desselben 100 u. ff., Messung der effektiven Stromstärke und Spannung 120, des Effekts 123 u. ff., Prüfung der Transformatoren 139, Untersuchung der Bleche 142 u. ff., Sicherheitsmaßregeln 149, Vergleich zwischen Einzeltransformatoren und Unterstationen 153,

- Verwendung als Spannungserhöher 158, als Drosselspule 162. 166, als Ausgleichspule bei in Serie geschalteten Lampen 167, im Dreileitersystem 169, in Scott's System der Stromverteilung zur Umwandlung von Zweiphasen- in Dreiphasenstrom 170, Transformator von Siemens & Halske 173, von Schuckert & Co. 176, von Schwartzkopff & Co. 180, von Siemens Brothers & Co. 180, von Brown, Boveri & Co. 181, von W. Lahmeyer & Co. 183, von der Brush Electrical Engineering Co. 183, von Johnson & Phillips 187, von Ganz & Co. 187, von der Maschinenfabrik Oerlikon 190, von der Electric Construction Company 192, von der Allgemeinen Elektrizitätsgesellschaft 196, von der Westinghouse Electric Co. 198.
- Transmissionsmethoden zur Energiemessung** 134.
- Unterstationen und Einzeltransformatoren, Vergleich zwischen** — 153.
- Vektordiagramm für Stromstärke und Spannung** 55.
- Verluste in Transformatoren 15. 40, Kurven für die — 18, Einfluß der Spannungskurve auf den Hysteresisverlust 18, Einfluß der Kern- und Spulenform auf die — 23, günstigste Verteilung der Verluste bei der Konstruktion 77 u. ff.
- Voreilung zwischen Strom und Spannung 55.
- Wattkomponente des Stromes** 60.
- Wattlose Komponente des Stromes 60.
- Wattmeter, Messung der Energie mittels — 123 u. ff.
- Weber, Dynamometer 121.
- Westinghouse Electric Co., Transformator der — 33. 198.
- Wirbelströme, Verlust durch — 16.
- Wirkungsgrad und Leistung in ihrer Abhängigkeit von den linearen Dimensionen 44 u. ff.
- Wirtschaftlicher Betrieb 80.
- Zusammensetzung von Strömen und Spannungen** 60.

Druck von R. Oldenbourg in München.

Kapp, Gisbert

Transformatoren für Wechselstrom und Drehstrom eine Darstellung ihrer
Theorie, Konstruktion und Anwendung

Berlin 1895

Techn. 118 oe

urn:nbn:de:bvb:12-bsb11889219-2